



COMMUNE DE RUEIL-MALMAISON

Service de la Commande Publique

13 boulevard du Maréchal Foch

92501 RUEIL-MALMAISON CEDEX

MISE EN PLACE ET EXPLOITATION D'UN RÉSEAU DE CHALEUR SUR L'ÉCOQUARTIER DE L'ARSENAL

Délégation de service public en application des articles L.1411-1 et suivants du CGCT

ANNEXE N°4 ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE - ZAC DE L'ARSENAL RAPPORT DE SYNTHÈSE



Département Énergie et Environnement
149, Avenue Jean Lolive
93695 PANTIN CEDEX
☎ 01.41.83.36.36

Fax 01.41.83.37.58

SOMMAIRE

PREAMBULE.....	5
I. LA PRODUCTION GEOTHERMIQUE	6
I.1. Les différents niveaux de ressource	6
I.2. La ressource très basse énergie (géothermie de surface).....	9
I.2.1. Les nappes aquifères et l'énergie du sous-sol	9
I.2.2. Caractéristiques techniques et économiques liées à l'exploitation de ces ressources.....	12
I.2.3. Le potentiel disponible	17
I.3. La géothermie profonde.....	25
I.3.1. La création d'un doublet géothermique sur le Dogger.....	25
I.3.2. Le potentiel disponible	29
II. LE BOIS ENERGIE	31
II.1. Les technologies.....	31
II.1.1. La chaudière bois.....	31
II.2. La ressource en bois en France et en Ile de France	33
II.3. Le potentiel disponible	35
II.4. Le potentiel disponible	36
III. LE SOLAIRE THERMIQUE	38
III.1. Les technologies des capteurs solaires	38
III.1.1. Le capteur vitré	38
III.1.2. Le capteur sous vide	39
III.2. La production de chaleur.....	40
III.2.1. Le principe de fonctionnement.....	40
III.2.2. Le potentiel solaire à Rueil Malmaison	42
IV. LA RECUPERATION D'ENERGIE SUR LES EAUX USEES.....	45
IV.1. Principe de fonctionnement.....	45
IV.2. Potentiel disponible à Rueil-Malmaison	50

IV.3.	Energie récupérable et investissements	51
V.	SCENARIOS DE PRODUCTION D'ENERGIE POUR LA ZAC.....	53
V.1.	Hypothèses générales.....	53
V.2.	La programmation.....	56
V.3.	Rappel des besoins.....	59
	La monotone des besoins est représentée sur le graphe suivant. Une hypothèse de couverture des besoins par deux systèmes EnR de 700 kW et 800 kW a été utilisée dans ce cas. L'appoint est fourni par des chaudières gaz.	62
V.4.	Scénario 1 – Scénario bois énergie	63
V.4.1.	Descriptif technique	63
V.4.2.	Evaluation économique	65
V.5.	Scénario 2 – PAC centralisée sur nappe – (scénario très optimiste)	68
V.5.1.	Descriptif technique	68
V.6.	Scénario 2 bis – PAC centralisée sur nappe (scénario optimiste)...	73
V.6.1.	Descriptif technique	73
V.6.2.	Evaluation économique	75
V.7.	Scénario 2 ter : PAC centralisée sur nappe – (scénario réaliste en termes de ressources géothermiques)	78
V.7.1.	Descriptif technique	78
V.8.	Scénario 2 ter : PAC centralisée sur nappe – (scénario réaliste en termes de ressources géothermiques)	79
V.8.1.	Descriptif technique	79
V.8.2.	Evaluation économique	81
V.9.	Scénario 3 : PAC décentralisées sur réseau d'eau tempérée	84
V.9.1.	Descriptif technique	84
V.10.	Scénario 4 – Réseau d'eau tempérée pour les bureaux et réseau basse température pour la ZAC hors bureaux	89
V.10.1.	Descriptif technique	89
V.10.2.	Evaluation économique	91

V.11.	Scénario référence : chaudières gaz collectives	95
V.11.1.	Descriptif technique	95
V.11.2.	Evaluation économique	96
VI.	SYNTHESE.....	98

PREAMBULE

Il est prévu sur le territoire de la ville de Rueil-Malmaison, la réalisation d'une ZAC.

D'une superficie de 26 hectares, ce projet, nommé la ZAC L'Arsenal prévoit la construction de logements, d'équipements publics et de locaux tertiaires, représentant environ 250 000 m², dans une perspective de développement durable, permettant de réfléchir au plus tôt, avant même les phases de conception, à la gestion des problèmes urbanistiques tels que :

- La gestion de l'eau (eau pluviale, assainissement),
- Les modalités de déplacement (déplacement doux) et de la gestion des espaces de circulation (voies principales, voies secondaires, voies piétonnes ...),
- L'intégration sociale, la participation des citoyens,
- La répartition et les interactions entre les différents espaces : logements/espaces publics / locaux tertiaires, espaces verts, ...
- La gestion des déchets.

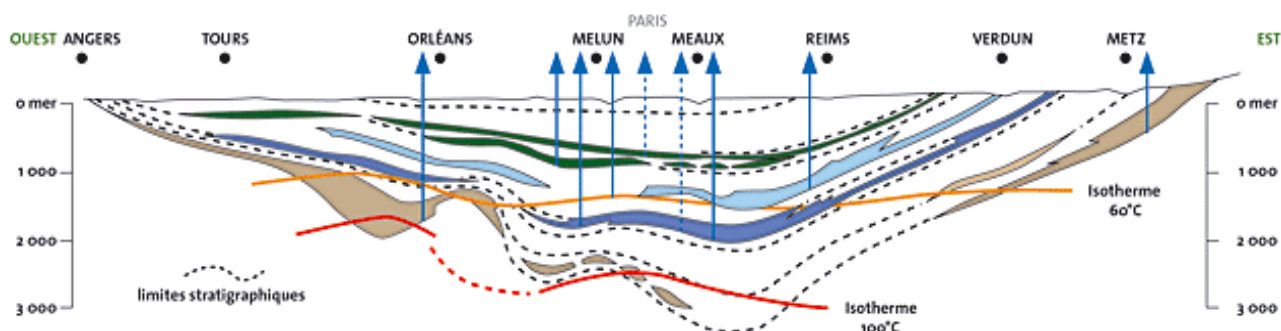
Dans le cadre de l'opération de la ZAC L'Arsenal, la ville de Rueil-Malmaison souhaite étudier **la faisabilité technico-économique de la mise en œuvre d'un réseau de chaleur**.

En effet, pour ce type de projet urbain, il est opportun d'étudier les avantages de cette solution (en particulier les intérêts du point de vue des impacts environnementaux) tout en prenant également en compte les inconvénients techniques et les impacts économiques et financiers générés par ce dispositif.

I. LA PRODUCTION GEOTHERMIQUE

I.1. Les différents niveaux de ressource

Le Bassin parisien est constitué d'un ensemble de couches sédimentaires qui s'empilent les unes sur les autres.



PÉRIODES		AQUIFÈRES	
SECONDAIRE	TERTIAIRE 65 millions d'années		
	CRÉTACÉ 140 millions d'années	NÉOCRÉTACÉ	Sables de l'Albien
		ÉOCRÉTACÉ	Sables du Néocomien
	JURASSIQUE 195 millions d'années	MALM	Calcaires du Lusitanien
		DOGGER	Calcaires du Dogger
	TRIAS 225 millions d'années	LIAS	Grès du Retien
PRIMAIRE		TRIAS	Grès de Lorraine à l'est Grès fluviatiles à l'ouest

Les nappes superficielles (< 200 m) sont constituées par des sables, des grès ou du calcaire dont les températures se situent entre 12 et 15°C. Les débits exploitables sont très variables d'un site à l'autre mais peuvent parfois dépasser 100 m³/h. Le recours à une pompe à chaleur est alors indispensable pour

relever le niveau de température.

Les sables de l'Albien les plus récemment déposés fournissent une température entre 25 et 30°C. Leur bonne valorisation thermique nécessite également le recours à une pompe à chaleur. Une exploitation intensive à des fins industrielles et pour l'alimentation en eau potable a fait baisser le niveau de la nappe (niveau piézométrique) et a conduit à une restriction de son accès par les pouvoirs publics. Ils constituent aujourd'hui une des plus importantes réserves d'eau potable de la région Ile de France.

Les sables du Néocomien, 150 mètres de profondeur en moyenne en dessous de l'Albien, offrent une eau entre 35°C et 50°C peu minéralisée. A l'aplomb de Paris, cet aquifère se situe à 750 m de profondeur (eau à 35°C) et peut atteindre 1100 m au centre du bassin (eau à 50°C). Une seule application pour le chauffage, couplée à l'alimentation en eau potable, existe à ce jour à Bruyères Le Châtel (dans un établissement du CEA¹).

Les calcaires du Lusitanien, datant du Jurassique, contiennent de l'eau à une température de 40°C à 60°C en moyenne avec une profondeur au centre du bassin de 1500 m.

Les calcaires du Dogger s'étendent sur une surface de 15 000 km² et datent du Jurassique moyen (170 millions d'années). **La température y varie entre 56°C et 85°C** avec une minéralisation totale allant de 6,5 g/L à 35 g/L. La salinité de l'eau et la présence de certains éléments chimiques comme les sulfures nécessitent, pour l'exploitation géothermique, la mise en place de dispositifs de protection contre la corrosion.

Le potentiel thermique de cet aquifère est exploité en Ile de France car sa localisation concorde bien avec les zones urbanisées denses. A près de 3 km de profondeur, se trouve la formation la plus ancienne, le Trias constitué de grès.

¹ Commissariat à l'Energie Atomique

Deux types de géothermie

Il existe plusieurs types de ressources géothermiques en fonction de leur technique de mobilisation et de leur profondeur.

Ainsi pour **une géothermie de surface**, la chaleur d'une nappe ou la chaleur du sol seront utilisés pour le chauffage des bâtiments et/ou la production d'ECS via une pompe à chaleur.

Une géothermie profonde nécessitera la création d'un réseau de chaleur alimentant l'ensemble du quartier (voire les bâtiments à proximité du quartier) pour rentabiliser les investissements initiaux importants.

Les principales réglementations associées à l'utilisation de nappe aquifère sont présentées en annexe 1.

I.2. La ressource très basse énergie (géothermie de surface)

I.2.1. Les nappes aquifères et l'énergie du sous-sol

Les nappes aquifères

Les nappes aquifères disponibles sous la ZAC L'Arsenal sont les aquifères :

- de l'Eocène moyen et inférieur. Cet aquifère s'étend sur l'Ile de France et sur le nord de la Seine et Marne sur une surface de 4.000 km². Les caractéristiques de cette nappe sont les suivantes² :
 - température moyenne = 13,5 °C,
 - débits compris entre 25 et 30 m³/h (source géothermie Perspectives),
 - profondeur = 10 à 40 mètres,
 - épaisseur de la nappe comprise entre 35 et 40 mètres
 - pH = 7,24 à 7,7,
- de la craie,
 - température moyenne = 13,5°C
 - débits compris entre 20 et 300 m³/h
 - profondeur du toit de la nappe = à partir de 60 mètres de profondeur
 - épaisseur de la nappe comprise entre 30 et 40 mètres
- de l'Albien, essentiellement réservé aux captages publics d'eau destinés à la consommation d'eau potable,
- de l'Yprésien.

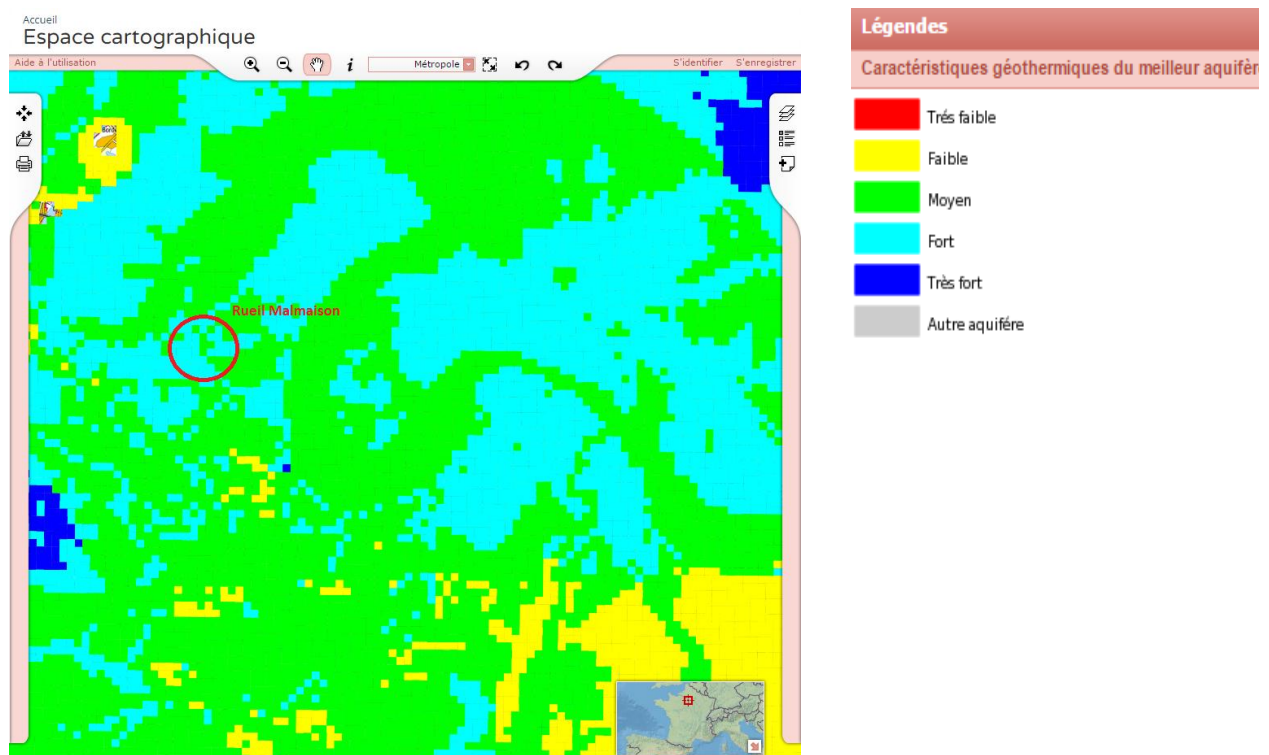
Les nappes situées dans le sous-sol, à moins de 100 mètres de profondeur pourraient être utilisées.

Il est nécessaire de réaliser études de pollution et sondages au préalable afin de valider la faisabilité.

Lors du ou des forages, l'étanchéité des nappes est à préserver.

² Source ARCADIS

La ZAC L'Arsenal se situe dans une zone de potentiel géothermique sur aquifère très basse énergie à potentiel moyen (voir cartographies ci-dessous) :



Une forte incertitude subsiste sur le débit disponible et le potentiel exploitable du fait de la nature du terrain. La ZAC se situe sur le flanc du Mont Valérien. La fissuration de la formation de la craie est susceptible d'être localement peu développée, engendrant de faibles débits.

Plusieurs exemples de projet à l'échelle du bâtiment d'exploitation d'aquifères très basse énergie via une pompe à chaleur existent en Ile-de-France et notamment :

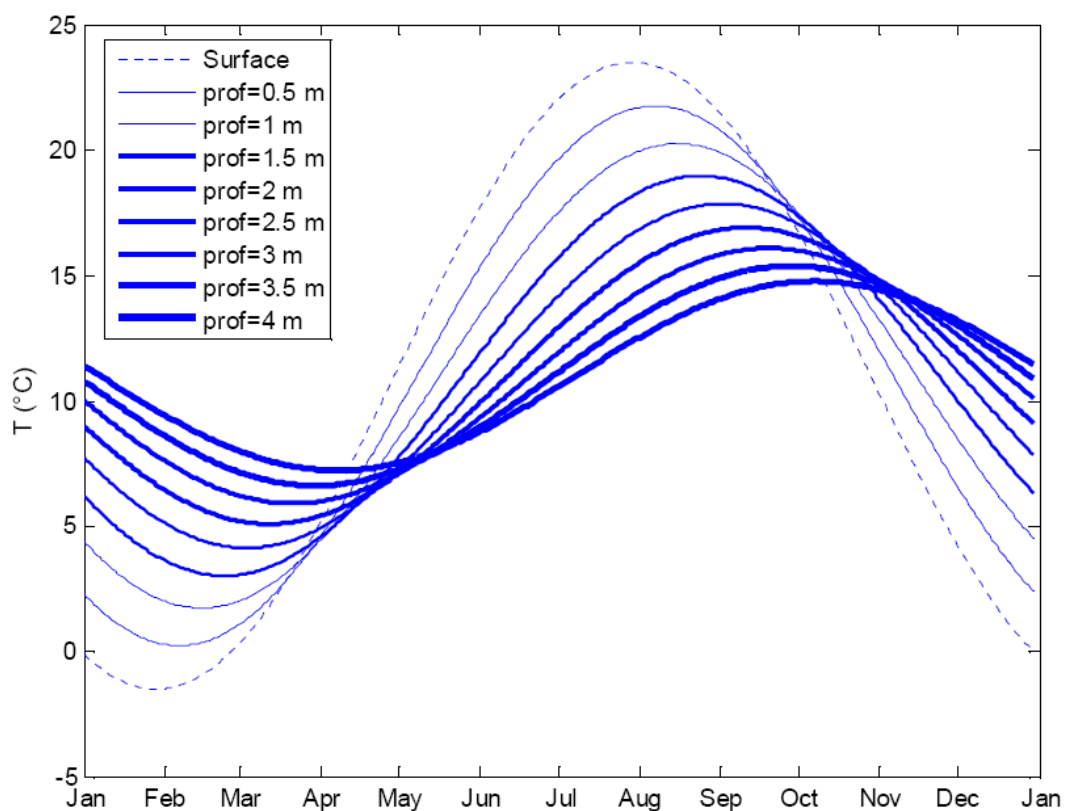
- Le pôle culturel d'Alfortville
- Le centre socio-culturel de Rueil-Malmaison

- **L'énergie du sol**

A très faible profondeur, l'énergie contenue dans le sol provient du soleil. En profondeur, et tant qu'il existe des variations notables des températures durant l'année, il s'agit d'une combinaison de l'énergie du soleil et de l'énergie du sous-sol.

La figure suivante montre les températures du sol en surface et à différentes profondeurs pour une température moyenne de 11 °C et d'amplitude crête à crête de 25 °C. Avec la profondeur, on peut observer une diminution de l'amplitude des variations et une augmentation du déphasage (inertie thermique plus importante).

A 4 mètres de profondeur, le déphasage est de 2 mois, ce qui permet d'être en adéquation avec les besoins des bâtiments (chaleur en hiver et climatisation en été).



Variation annuelle de la température du sol à plusieurs profondeurs

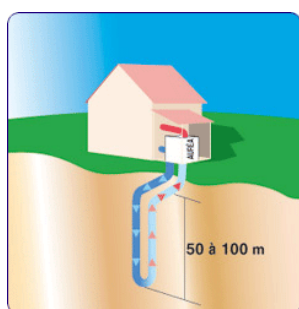
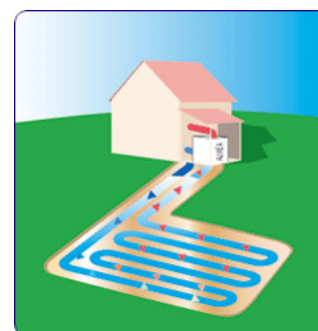
Dans ces deux cas (récupération d'énergie dans le sol et sur les nappes aquifères) un échangeur permet de récupérer les calories présentes, soit dans la nappe aquifère, soit dans le sol. Le débit pompé, ou passant dans le sol et l'écart de température entre le prélèvement et la réinjection seront les paramètres déterminants de l'énergie récupérable.

I.2.2. Caractéristiques techniques et économiques liées à l'exploitation de ces ressources

Les capteurs

Les calories contenues dans les nappes aquifères ou dans le sous-sol peuvent être récupérées à l'aide :

- de capteurs horizontaux. L'implantation de ce système nécessite une grande surface de pose (1,5 à 2 fois la surface à chauffer³), inadaptée à la fourniture en chaleur d'un bâtiment de plusieurs milliers de m² de SHON.



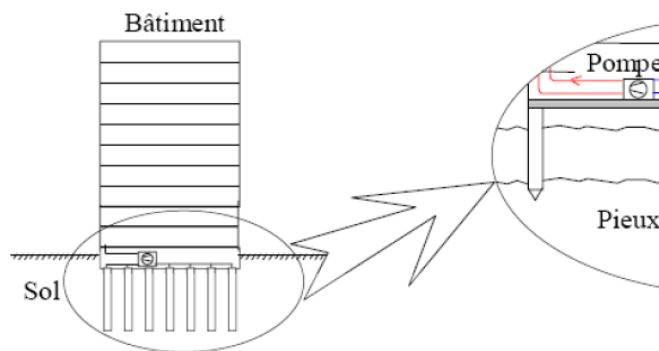
- de capteurs verticaux, technologie la plus adaptée à la fourniture en chaleur de bâtiments de grande surface. Ils peuvent être installés jusqu'à une profondeur de 100 mètres.

Les pieux de fondation géothermiques

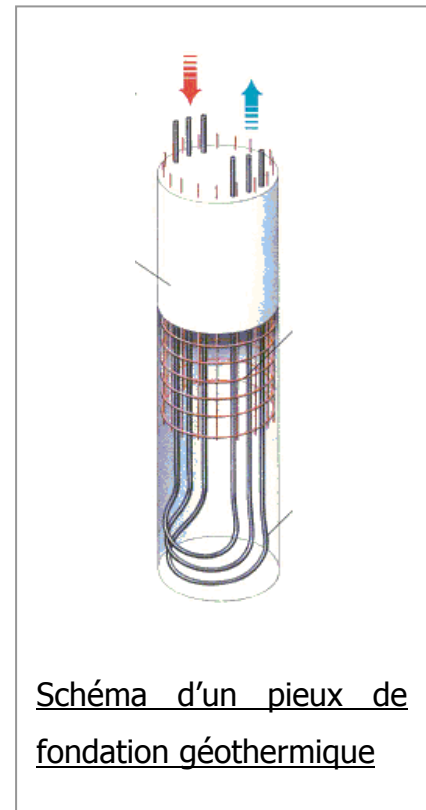
Il s'agit d'un **pieu de fondation équipé d'un tube ou réseau de tubes** de manière à pouvoir échanger de la chaleur avec le terrain. Il assure donc une

³ Source ADEME : « Les pompes à chaleur géothermiques »

double fonction: celle de reporter en profondeur les charges d'un terrain et celle d'échangeur de chaleur avec le terrain.



Les tubes à l'intérieur des pieux constituent un réseau de conduites en polyéthylène, souvent des doubles ou quadruples « U », selon le diamètre des pieux.



Ces tubes sont ensuite noyés dans le béton pour assurer un bon contact thermique.

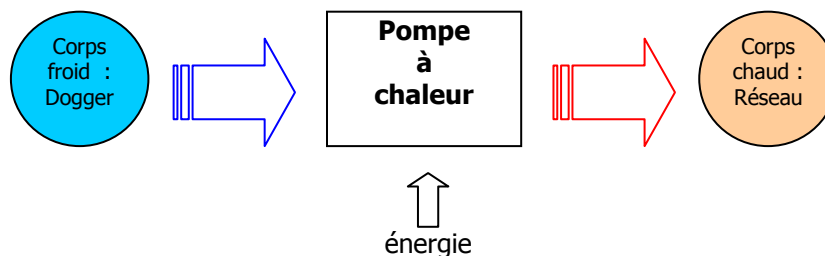
Tous les pieux nécessaires aux fondations d'un bâtiment peuvent être équipés d'un système énergétique

Ces calories récupérées ne peuvent être utilisées directement, la température du sol ou de la nappe étant de 12 à 15°C en moyenne. Un système de production énergétique est donc nécessaire : une pompe à chaleur.

La pompe à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) est une machine thermodynamique destinée à assurer le chauffage d'un local ou d'un système à partir d'une source de chaleur externe dont la température est inférieure à celle du local ou du système à chauffer.

C'est un système de chauffage qui transfère des calories d'un milieu à bas niveau de température vers un milieu où la température doit être supérieure.



L'écoulement naturel de la chaleur s'effectuant toujours d'un corps chaud vers un corps froid, on peut définir également la pompe à chaleur comme un matériel permettant de réaliser l'écoulement de chaleur inverse du sens naturel, c'est-à-dire d'un milieu froid vers un milieu chaud. Une dépense d'énergie est obligatoire pour réaliser ce transfert inverse. L'énergie nécessaire pour assurer le transfert doit être inférieure à l'énergie calorifique utile pour que le système soit viable économiquement.

Une pompe à chaleur est composée de 4 éléments principaux :

- **Un évaporateur** (échangeur de chaleur) qui vaporise le fluide frigorigène en prélevant de la chaleur dans la source froide. La vapeur sortant de cet évaporateur est saturée. L'évaporation s'effectue à la température de vaporisation du fluide frigorigène.
- **Un compresseur** mécanique (et son moteur) : le compresseur aspire la vapeur du fluide frigorigène issue de l'évaporateur et la comprime pour la rejeter dans le condenseur à une pression plus importante.

-
- **Un condenseur** : c'est un échangeur de chaleur (comme l'évaporateur) avec circulation du fluide frigorigène à condenser d'un côté, et de l'autre côté le fluide à réchauffer. Il condense le frigorigène en cédant la chaleur au caloporteur qui s'échauffe.
- **Un détendeur** : qui alimente en frigorigène l'évaporateur sans excès ni défaut. Le frigorigène y subit la détente.

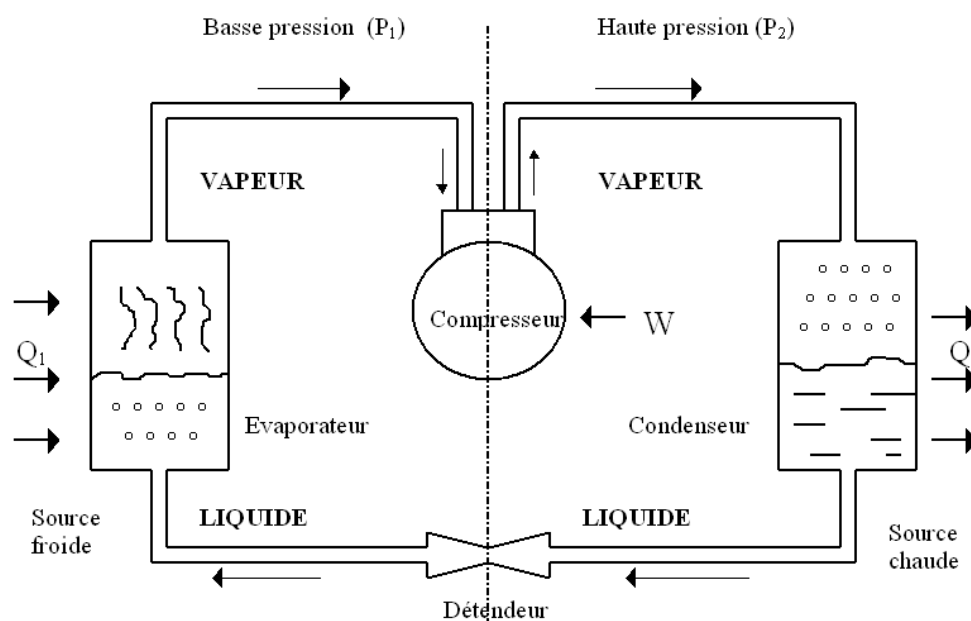


Schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur

Il existe différentes technologies pour les PAC géothermiques. La principale différence réside dans la nature des fluides circulant dans les capteurs et les émetteurs de chauffage.

La pompe à chaleur air/eau, système où les calories sont récupérées sur l'air ambiant, n'a pas besoin de capteur, mais n'est pas adaptée aux grandes puissances. De plus son coefficient de performance est le plus faible de tous les procédés.

Les autres procédés : sol-sol, eau glycolée-eau et sol-eau sont présentés en annexe 2.

Le fonctionnement théorique de la pompe à chaleur est expliqué en annexe 3.

Cette pompe à chaleur peut fonctionner grâce à l'électricité mais également grâce au gaz. La seule différence concerne le moteur du compresseur, qui est un moteur électrique ou un moteur thermique fonctionnant au gaz selon le cas.

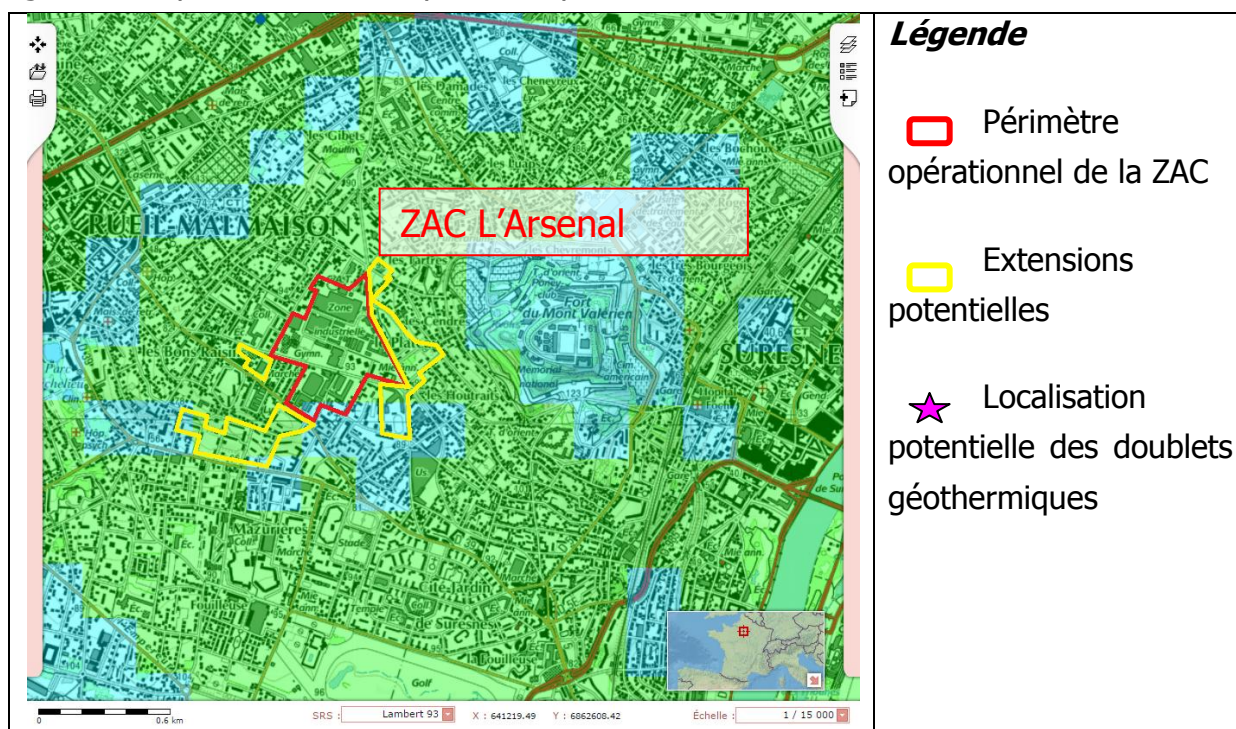
Le coefficient de performance est compris entre 3 et 5 pour une pompe à chaleur fonctionnant grâce à l'électricité et entre 1,6 et 2 pour une pompe à chaleur fonctionnant au gaz.

I.2.3. Le potentiel disponible

La ressource

L'aquifère le plus favorable est la nappe de la craie. Une grande incertitude pèse sur l'évaluation du débit disponible. Dans les hypothèses les plus optimistes du site Géothermie perspectives, les débits pourraient monter jusqu'à 300 m³/h. Néanmoins, les données de débits des forages existants à proximité de la ZAC sont nettement inférieures : 50 m³/h pour les meilleurs débits. Par ailleurs, la localisation du projet, sur le flanc du Mont Valérien laisse présager des débits plus faibles : 15-30 m³/h ; les débits les plus forts sont observés à proximité immédiate de la Seine.

Sur la carte ci-dessous figure la position du quartier (en rouge) et le potentiel géothermique du meilleur aquifère disponible.



Le potentiel identifié sur la carte ci-dessous est néanmoins très incertain du fait du contexte topographique et des données issues des forages environnants.

Les ouvrages existants dans le sous-sol à proximité de la ZAC sont indiqués sur le plan suivant. Leurs caractéristiques figurent dans les tableaux suivants.



Vue aérienne des ouvrages existants dans le sous-sol – Source BSS

Sur le plan précédent figurent en jaune les ouvrages avec géologie initiale et documents. En marron, les ouvrages avec géologie vérifiée et documents.

Le détail des informations disponibles grâce aux ouvrages existants figure dans le tableau suivant.

N°	Identifiant BSS	XL2E	YL2E	Adresse	Nature	Prof (m)	Date réalisation	Z sol	Etat ouvrage
1	01831C0162/S1764	589974	2430906	126-138 rue Danton	sondage	12	Mai 1969		Remblai
2	01831C0160/S5X033	590079	2431027	Rue Eugène Sue	sondage	6,3	Janv 1965	92 m	Remblai
3	01831D0361/S2X033	590121	2431012	Rue Eugène Sue	sondage	7,9			
4	01831D0581/F2	590375	2430841	Rue Eugène Sue	sondage	24,15	Juin 1972	110,8	
5	01831C0089/F1	590069	2430706	79, rue Galliéni	sondage	8,5	Mar 1970	95,45	Remblai
6	01831D0150/S1	590094	2430286	Rue de Chateaubriand	sondage	11,5	Oct 1966	92,05	Remblai
7	01831C0113/F6					4			
8	01831C0111/F3				sondage	10			
9	01831C0163/S2633	590039	2430296	Rue de la chapelle	sondage	16,8	Janv 1964	92	Remblai
10	01831D0151/S2	590094	2430226	Rue des bons raisins	sondage	10	Nov 1966	91,65	
11	01835B0164/SF5				sondage	11,5			
12	01835B0165/SF7				sondage	10			
13	01831C0112/F4	590044	2430206	Les bergères	sondage	13	Nov 1966	91,9	
14	01835A0005/S11	589219	2430051	Rue La Fontaine	sondage	36,2	Jan 1934	56,66	
15									
16	01835A0019/SF1	589118	2430131	9 route Saint-Cloud	sondage	25	Avr 1969	57,2	
17									
18									
19	01831C0037/041S1	589344	2430856	Rue C.Drot	sondage	16,5	Mar 1965	56,93	

Aucun puits situé à moins de 1 km de la ZAC ne permet d'obtenir d'informations sur les débits obtenus au niveau de la nappe de la craie.

A Nanterre, 3 forages situés à 2 km au nord de la ZAC donnent des débits compris entre 20 et 50 m³/h à partir de la nappe de la craie.

Les données de ces forages sont les suivantes :

N°	Identifiant BSS	XL2E	YL2E	Adresse	Nature	Prof (m)	Date réalisation	Z sol	Etat ouvrage	Utilisation	Aquifère capté	Q (m ³ /h)	S (m)	Q/s (m ² /h)	Temp (°C)	NS (m)
	01831C0387/F3	589634	2432109	ZAC Ste Geneviève	Forage	72	Mar 2011	34		Géothermie	Montien+craie	50	21	2,4		15,99
	01831C0386/F2	589794	2432080	ZAC Ste Geneviève	Forage	96	Fév 2011	35		Géothermie	Craie	45	21	2,1		15,99
	01831C0445/EAU	589452	2432592	60 rue H.Barbusse	Forage	69	25/10/10	30		Géothermie	Craie	28	32	0,9		12,91

Compte tenu de ces données, les informations de Géothermie Perspectives semblent optimistes. Des débits de l'ordre de 30 m³/h peuvent être espérés dans le périmètre de la ZAC, voir étude de prédimensionnement hydrogéologique, en annexe au présent rapport).

Cette nappe peut être exploitée via la création de doublets géothermiques (puits de production et puits de réinjection) pour prélever et réinjecter l'eau.

Les calories sont prélevées sur l'eau géothermale, grâce à une pompe à chaleur. Cette dernière fournit les calories pour chauffage et ECS avec un appoint gaz.

Deux scénarios sont étudiés (scénarios 2 et 3 dans la suite du document).

- Scénario 2 : installation d'une pompe à chaleur centralisée

Dans ce cas, un réseau d'eau basse température est créé (départ à 70°C environ). L'avantage de cette solution est de réduire les investissements sur les pompes à chaleur (une seule PAC alimente la ZAC). Une chaufferie gaz permet de produire l'énergie d'appoint.

L'inconvénient est que le froid ne peut être produit grâce au réseau.

- Scénario 3 : installation de pompes à chaleur par bâtiment

Dans ce cas, un réseau d'eau tempéré est créé (départ à 12°C environ). L'eau circulant dans la ZAC est à un niveau tempéré en mi-saison et en été (environ 12°C sur le départ et 5°C) sur le retour.

En hiver et en période froide, une chaufferie gaz permet de fournir l'appoint et remonter le niveau de température départ du réseau.

Dans ce scénario, le réseau peut être utilisé pour production de chaud (chauffage et ECS) et de froid (rafraîchissement à destination des locaux à usage de bureaux).

Scénario 2 : PAC centralisée

Une unique pompe à chaleur relève le niveau de température du réseau pour alimenter tous les bâtiments de la ZAC pour la production de chauffage et ECS (eau chaude sanitaire). Le schéma est le suivant :

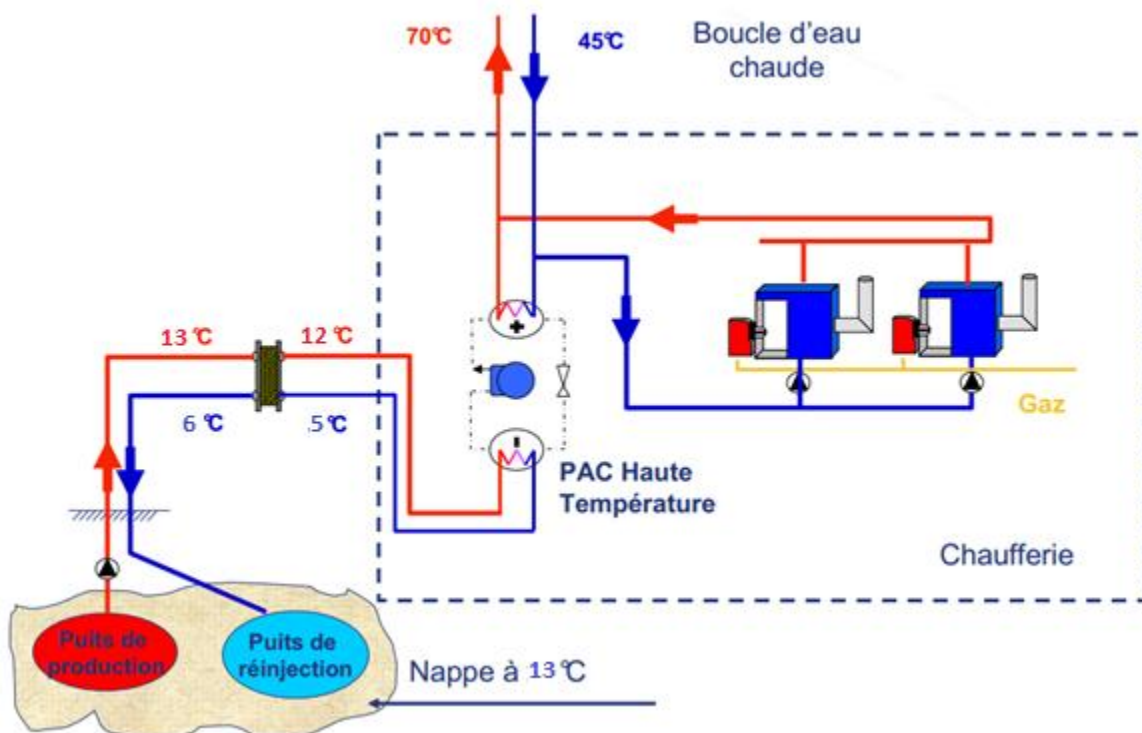


Schéma d'une boucle tempérée sur géothermie très basse énergie une PAC collective

Avec ce premier schéma d'installation, de l'eau chaude, à 70°C alimente chaque bâtiment de la ZAC. Seule de la chaleur est produite.

Le niveau de température est fixé à 70°C pour la production d'ECS des bâtiments. Dans le cas où seul le chauffage est fourni par le réseau, le niveau de température du réseau peut être descendu à 40°C.

Scénario 3 : pompes à chaleurs décentralisées

Dans ce scénario, il est nécessaire d'installer une pompe à chaleur dans chaque sous-station en pied de bâtiment.

L'eau de la nappe circule dans la boucle tempérée de la ZAC avant d'être rejetée via le puits de réinjection dans la nappe.

Dans ce cas, l'eau alimentant les sous-stations est à une température comprise entre 12 et 16°C. Il est donc possible de produire chauffage et ECS sur une partie des bâtiments et du froid, simultanément, sur une autre partie des bâtiments (bureaux en été par exemple) grâce à l'installation de pompes à chaleur réversibles.

Le schéma de ce scénario est le suivant :

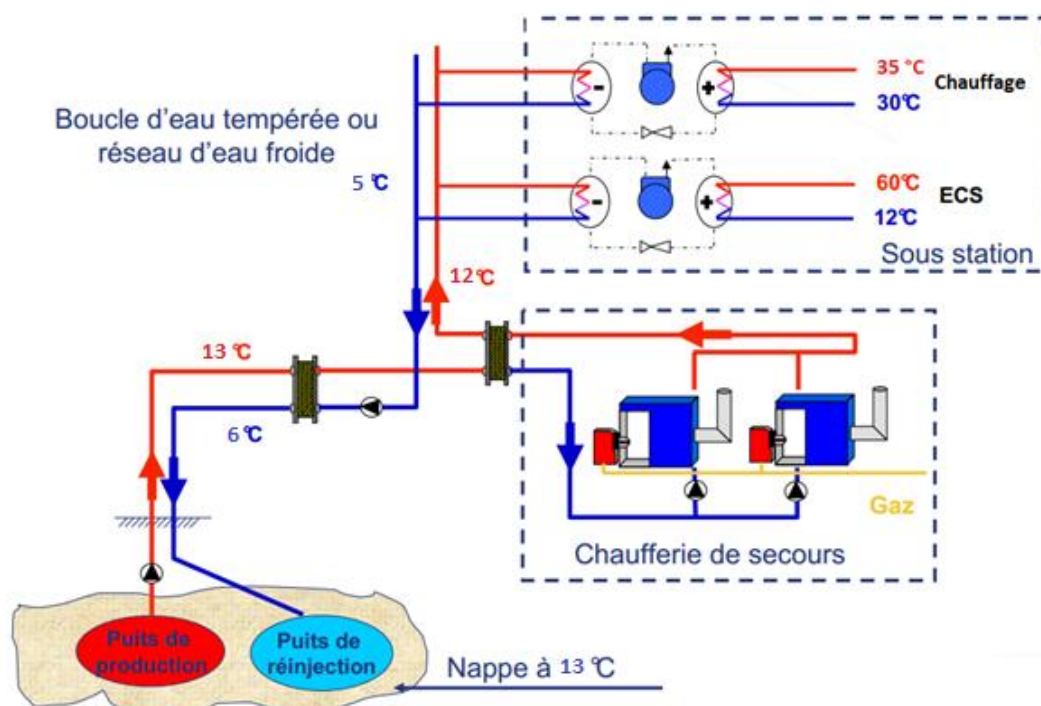


Schéma d'une boucle tempérée sur géothermie très basse énergie avec une PAC par bâtiment

Cette énergie ne peut être utilisée qu'avec des systèmes de distribution basse température (panneaux de sol, radiateur basse température, aérothermes...).

Le potentiel de production de chauffage des deux scénarios d'exploitation de la nappe de la craie à l'échelle de la ZAC via un micro réseau est le suivant :

Pour couvrir 60% des besoins de la ZAC en énergies renouvelables et de récupération, une puissance de 1 500 kW doit être produite à partir des énergies renouvelables et de récupération (EnR&R).

Avec une solution PAC sur nappe, le débit total à prélever sur la nappe pour couvrir 60% des besoins de la ZAC est de 200 m³/h, avec un delta T de 6,5°C.

Ce delta T a été pris comme hypothèse compte tenu des niveaux de température sur la nappe et du pincement au niveau de l'échangeur.

Le scénario PAC sur sondes n'est pas développé plus en détail puisque pas adapté à une production de chaleur centralisée.

En effet, pour couvrir 60% des besoins de la ZAC, 400 sondes seraient nécessaires, en supposant une ressource de 50 W/ml exploitable 2400 heures par an.

L'implantation de 400 sondes n'est pas compatible avec l'emprise prévue pour le projet de ZAC.

I.3. La géothermie profonde

I.3.1. La création d'un doublet géothermique sur le Dogger

Le principe de la géothermie profonde consiste à récupérer les calories contenues dans le sous-sol et ayant pour origine la dissipation de la chaleur interne du globe à l'aide d'échangeurs de chaleur.

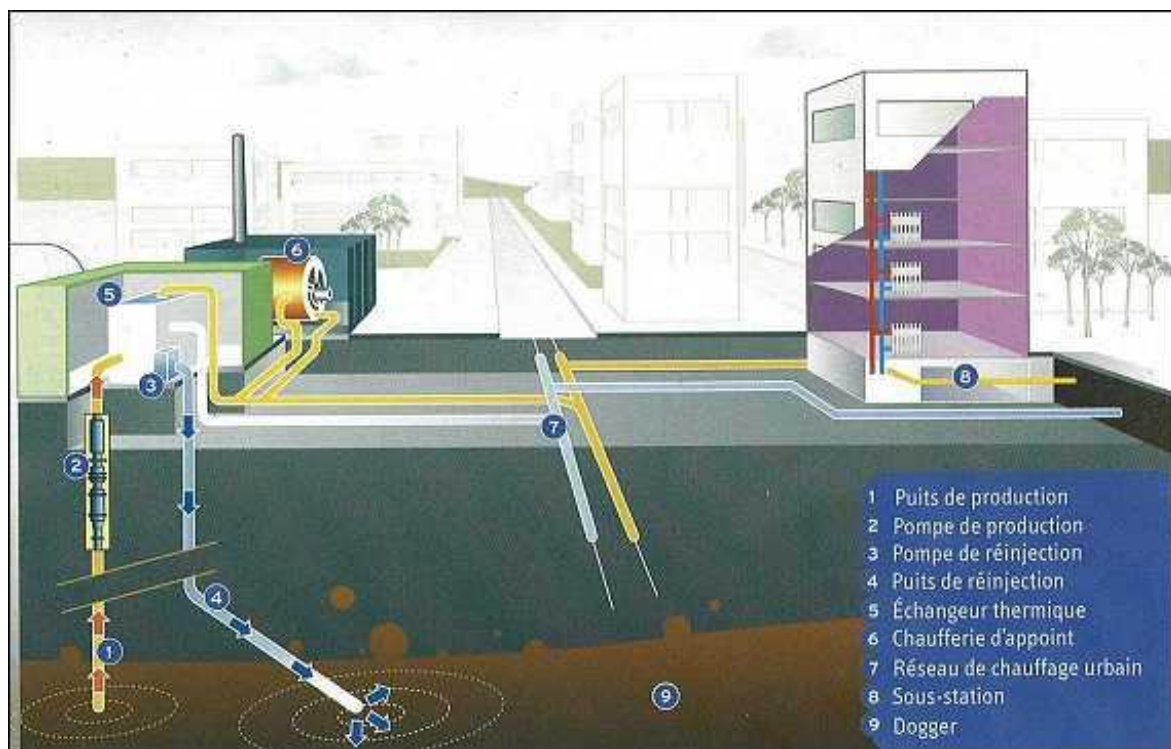


Schéma de principe d'une géothermie sur Dogger.

La création d'un doublet géothermique s'oriente autour de deux principales étapes : l'étude géologique et les travaux de forage et d'installation des pompes de puisage et de réinjection.

Etude géologique

Un gisement géothermal est comparable à un « réservoir » composé de roche perméable dans laquelle circule de l'eau (sous forme liquide ou gazeuse). **La première phase d'un projet de création d'un doublet géothermique est la phase d'exploration.** Elle permet de :

- déterminer la structure géologique de la roche,
- caractériser la quantité et la qualité du fluide géothermal,
- déterminer les conditions d'alimentation du réservoir,
- étudier la densité de la roche,
- mesurer les paramètres qui permettront de déterminer l'exploitabilité du gisement (température débit, pression, fracturation, porosité de la roche, salinité de l'eau, etc.).

Les forages et l'installation des pompes

La technique utilisée dans le forage de puits géothermiques est la technique Rotary. Elle consiste à utiliser un outil qui détruit la roche sous l'effet du poids et de la rotation. Le poids est assuré par un ensemble de tiges lourdes et creuses, assemblées en un train qui achemine sous pression les boues de forage. Les boues participent ainsi au déblaiement du trou mais également au refroidissement de l'outil. Autour des parois du forage, des tubes sont descendus et du ciment est injecté afin de garantir la tenue des parois du puits, ainsi qu'une protection contre la corrosion mais aussi la protection des nappes d'eau souterraines et leur isolation thermique.

Si l'eau de l'aquifère exploité est chargée en sel minéraux, et que son rejet en surface n'est pas compatible avec les normes environnementales, il y a nécessité de réinjecter le fluide dans sa nappe d'origine (c'est le cas du Dogger). Son exploitation nécessite donc deux forages, **un forage de production et un forage de réinjection.**

L'eau prélevée est extraite soit par artésianisme (jaillissement naturel), soit par l'intermédiaire d'une pompe immergée.

Les pompes immergées sont largement utilisées dans le Bassin parisien pour pomper la nappe du Dogger. Elles permettent d'obtenir des débits importants (supérieurs à 300 m³/h). Pour la réinjection, des pompes de surface (classiques) sont utilisées.

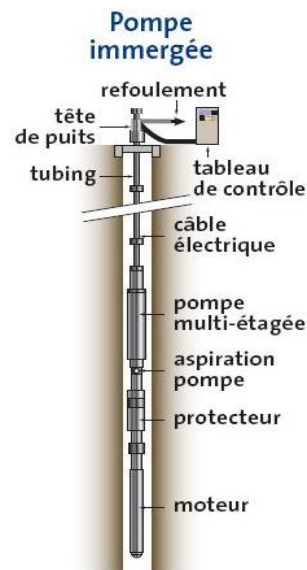


Schéma d'une pompe immergée (source BRGM)

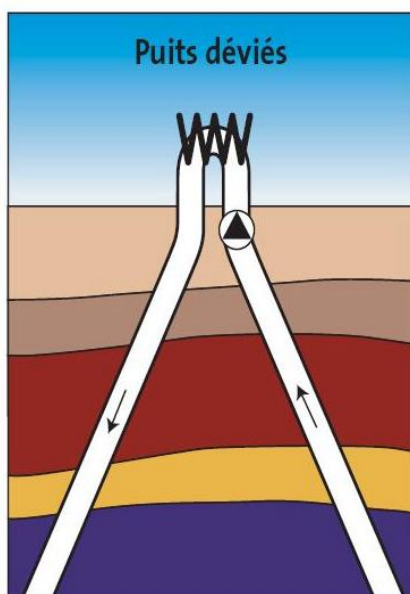


Schéma du type de doublet géothermique utilisé en Ile-de-France (source BRGM)

Afin de ne pas refroidir le réservoir, les puits d'exploitation et de réinjection doivent se trouver à une distance minimum l'un de l'autre (1500 mètres minimum).

En effet, dans le cas d'un doublet, la distance entre puits au niveau du réservoir est calculée pour **qu'aucune baisse de température n'apparaisse dans un délai équivalent à la durée de vie de l'installation (20 à 30 ans)**. Une bonne gestion est donc nécessaire car la ressource, pompée à outrance, pourrait s'épuiser assez vite, surtout si aucun dispositif de réinjection n'a été prévu.

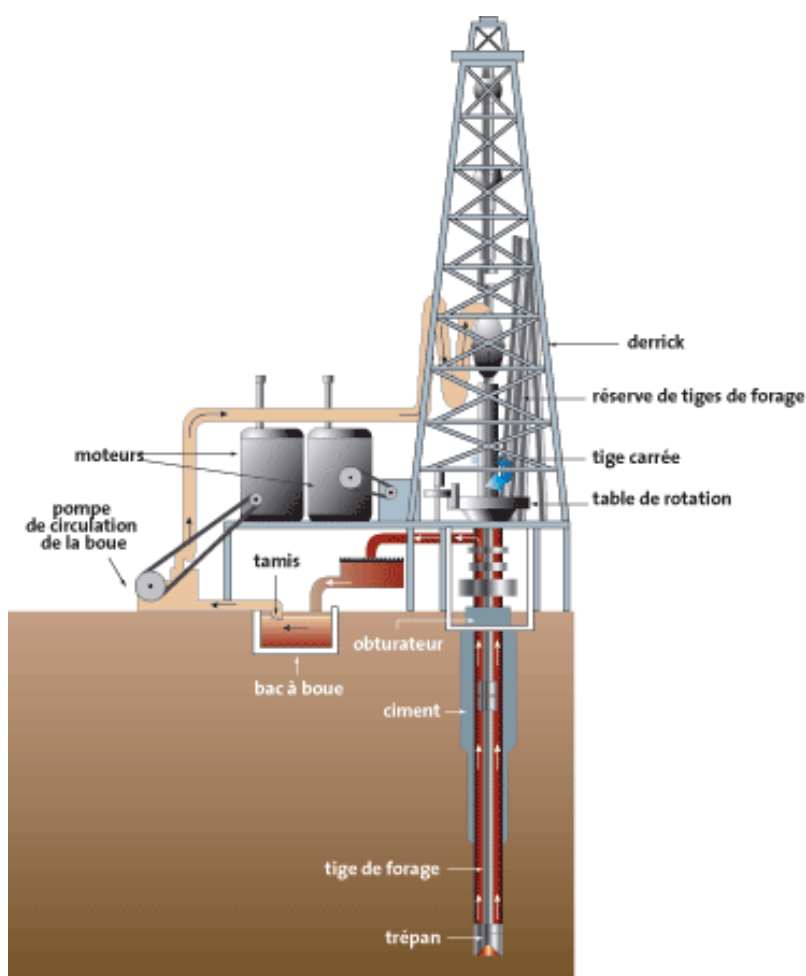


Plate-forme de forage Rotary

Le forage du puits nécessite un terrain d'une surface de 7 000 m² à 8 000 m² vierge de toute construction pour le maniement des foreuses. En zone urbaine, il est nécessaire de disposer d'appareils de forage compacts pour limiter l'emprise au sol, et silencieux pour pouvoir travailler jour et nuit avec le minimum de nuisances pour les riverains, pendant les travaux. En phase d'exploitation la surface des équipements du puits est d'environ 150 m² (tête de puits, échangeur, pompe...).

Les risques d'exploitation de la ressource

Afin de réduire les risques financiers liés à l'exploitation d'une ressource minière, la géothermie profonde bénéficie d'un mécanisme de garantie long terme géré par la

SAF⁴ approvisionné notamment par les maîtres d'ouvrage et couvrant les aléas associés à la création et l'exploitation des puits :

- couverture jusqu'à 90% des investissements du premier forage moyennant une cotisation équivalente à 3,5% du coût des travaux,
- couverture sur 20 ans des risques d'exploitation moyennant une cotisation annuelle de 13 k€.

Le retour d'expérience sur l'exploitation des puits géothermiques en région parisienne révèle toutefois une stabilité dans le temps de la ressource énergétique.

Les principaux textes réglementaires français qui peuvent s'appliquer aux fondations géothermiques sont les normes du domaine géotechnique, le code minier, le Code de l'environnement et le Code de la santé publique.

I.3.2. Le potentiel disponible

La ressource

La puissance disponible grâce à un forage sur le Dogger est comprise entre 6 et 9 MW, avec un débit de 270 à 300m³/h et une chute de température de l'ordre de 25°C avant sa réinjection. **L'énergie récupérable annuellement, par la création de ce doublet géothermique est de 75.000 MWh environ**. Cette énergie ne peut être utilisée qu'avec des systèmes de distribution basse température (panneaux de sol, radiateur basse température, aérothermes...).

Les besoins globaux de la ZAC L'Arsenal en terme de chauffage et d'ECS étant de l'ordre de 16 200 MWh, il est inutile d'installer un tel système de production énergétique sauf dans le cas d'une création de réseau de chaleur qui alimenterait une zone beaucoup plus large.

⁴ Société Auxiliaire de Financement filiale de la caisse des dépôts et consignations.

Le foncier

Une surface de 1 200 m² est à prévoir pour la réalisation d'un doublet sur le Dogger

Les investissements

Les investissements relatifs au forage d'un puits dans le Dogger sont identiques que la puissance extraite soit de 9 MW ou de 3MW. Ainsi un forage coûte environ 12 millions d'euros et la création de 2 200 mètres de réseau pour relier l'ensemble des bâtiments au puits serait de 2,47 millions d'euros. Le coût du bâtiment chaufferie avec système d'appoint secours est évalué à environ 1,9 M€ HT.

Pour la création d'un doublet géothermique de 3 MW et du réseau d'alimentation des bâtiments, les investissements seraient de 5.500 €/kW. Pour un doublet de 9 MW, les investissements seraient de 1.800 €/kW (avec création d'un réseau de chaleur).

Ces niveaux d'investissements sont incompatibles avec la programmation de la ZAC. Les scénarios géothermie profonde et moyenne profondeur ne sont pas retenus.

En revanche, les scénarios basés sur des solutions de géothermie de faible profondeur (<200 mètres) sont compatibles avec la programmation de la ZAC. Ils sont retenus dans les scénarios étudiés. Un forage test permettra de mieux évaluer le productible issu de cette ressource.

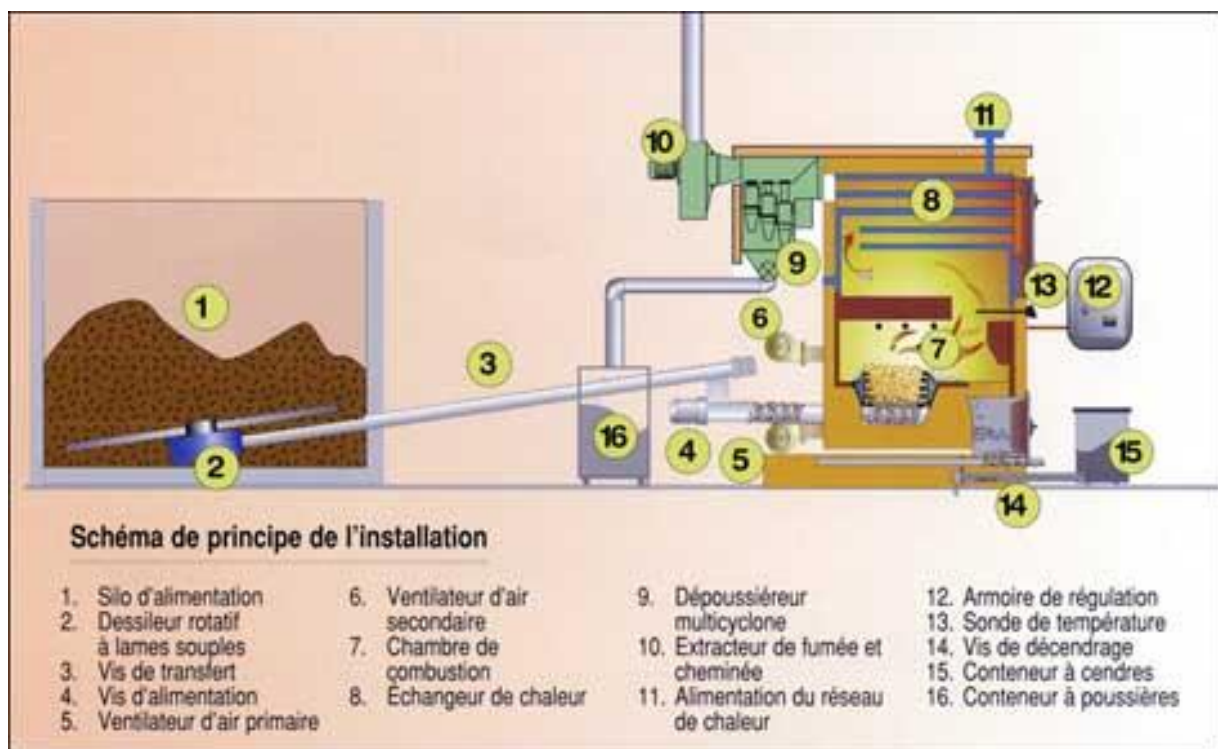
II. LE BOIS ENERGIE

II.1. Les technologies

II.1.1. La chaudière bois

Le principe de fonctionnement

Le bois est acheminé par des camions jusqu'au silo de déchargement. Il est ensuite transféré vers le silo de stockage/alimentation. Un système de convoyeur amène le bois jusque dans la chaudière où la combustion s'effectue. Les fumées sont traitées avant leur passage dans l'atmosphère et les cendres sont évacuées.



Le silo, situé à proximité immédiate de la chaufferie permet l'alimentation de la chaudière et assure une autonomie de plusieurs jours à plusieurs semaines selon sa capacité de stockage.

Les chaudières bois sont équipées de ramonage automatique permettant de maintenir le rendement de l'installation et d'éviter les arrêts pour maintenance. L'ensemble du process est entièrement automatisé.

Il existe plusieurs types de foyer en fonction du combustible, de la puissance et de l'humidité. Le tableau ci-dessous présente les différents types de foyer existants avec leurs caractéristiques.

Type	Puissance de chauffe	Combustible	Humidité en %
Volcan	20kW à 2,5 MW	Plaquettes forestières, plaquettes de sous-produits de transformation du bois	5 à 45
à insufflation	200 kW à 10MW	Sciures et copeaux secs	5 à 20
à grille mobile	150 kW à 25 MW	Tous combustibles bois	5 à 60
Volcan avec grille rotative	2 à 25 MW	Produits très humides	40 à 65
à lit fluidisé stationnaire	5 à 15MW	Produits très humides	5 à 60
à lit fluidisé circulant	25 à 500MW	Produits très humides	5 à 60

Les rejets des chaudières bois :

La combustion du bois ne contribue pas à l'émission de CO₂ puisque le CO₂ dégagé par la combustion du bois dans la chaufferie est intégralement réabsorbé par les forêts gérées de façon durable.

Les systèmes de traitement des fumées existant permettent de répondre aux exigences réglementaires concernant les rejets atmosphériques.

Les poussières ont un impact local sur l'environnement, mais des progrès techniques ont été réalisés pour améliorer la combustion et traiter les fumées.

II.2. La ressource en bois en France et en Ile de France

Le volume de bois sur pied dans les forêts françaises est estimé en 2005 à 2,37 milliards de m³. Ce volume calculé par l'IFN (Inventaire Forestier National) correspond au volume bois fort tige (sur écorce) des arbres vivants dont le diamètre à 1,30 mètres du sol est supérieur ou égal à 7,5 cm.

Il a augmenté de 6,7 % en 19 ans (1,85 milliards de m³ pour 1986). Durant la même période le volume par hectare est passé de 138 m³/ha à 160 m³/ha







La forêt privée comprend 70 % du volume de bois sur pied. Les volumes à l'hectare sont plus élevés en forêt domaniale.


La carte représentée en annexe montre la répartition moyenne de bois (feuillus-résineux) sur pied par région forestière nationale. Il apparaît ainsi que la forêt française est surtout composée de feuillus : 63 % du volume sur pied et deux tiers de la surface boisée de production. Hormis le massif landais dominé par le pin maritime, les feuillus sont caractéristiques des zones de plaine et les résineux, des zones de montagne et de la zone méditerranéenne.

Les essences contribuant le plus au volume total sur pied sont les chênes sessile et pédonculé pour un quart du stock, le hêtre 11 %, l'épicéa commun 8 %, le pin maritime et le sapin pectiné 7 % chacun.

En ile de France, le volume de bois sur pied est de 21 millions de m³ sur une superficie d'environ 127.000 hectares.

Le tableau ci-dessous, répartissant les chiffres cités précédemment entre le domaine public et privé est issu du site « Inventaire Forestier National » organisme dépendant du ministère de l'agriculture et de la pêche.

Méthode :	Ancienne méthode	
Domaine géographique :	Département	Modifier 
Valeur du domaine géographique :	Île-de-France Ouest (75,78,91,92,93,94,95)	Modifier 
Domaine temporel :	Dernier cycle (2003)	Modifier 
Domaine d'étude :	Forêt de production	Modifier 
Variables :	Superficie, Volume, Production en volume	Modifier 
Ventilation de niveau placette :	Classe de propriété (Public / Privé)	Modifier 
Ventilation géographique :	Département	
Séparation levé / non levé :	Non	

Réinitialiser Exporter au format CSV 

Site	Classe de propriété (Public / Privé)	Superficie x 1 000 ha	Volume x 1 000 m ³	Production en volume x 1 000 m ³ /an
Île-de-France Ouest (75,78,91,92,93,94,95)	Public	44 ± 1	7 774 ± 766	267,2 ± 23,4
Île-de-France Ouest (75,78,91,92,93,94,95)	Privé	83 ± 3	12 961 ± 1 177	494,1 ± 39,5
Total		127 ± 3	20 735 ± 1414	761 ± 45,8

Les résultats sont exprimés sous la forme : $x \pm y$. Cela signifie que la valeur estimée est comprise dans l'intervalle $[x - y ; x + y]$ avec une probabilité de 95 %.

II.3. Le potentiel disponible

La ressource

Les consommations annuelles de l'ensemble de la ZAC L'Arsenal (périmètre opérationnel) sont évaluées à 16,2 GWh/an.

Avec l'installation d'une première chaudière de 800 kW en phase 1 lors de la livraison des premiers bâtiments, puis d'une seconde de 700 kW (soit 1 500 kW installés) en phase 3, la couverture EnR est évaluée à 63%, le bois couvrira environ 10,2 GWh/an des besoins lorsque tous les bâtiments de la ZAC L'Arsenal seront raccordés.

Les consommations de plaquettes bois correspondantes sont de 2 800 tonnes par an, soit 10 800 m³/an.

Pour fournir les besoins de la ZAC, avec une couverture EnR supérieure à 60%, une chaudière plaquettes bois de 800kW est à installer en première phase, puis une deuxième chaudière de 700 kW lors des raccordements ultérieurs pour une puissance totale bois installée de 1,5 MW.

Un silo de stockage de 288 m³ est prévu afin de garantir une autonomie de 4 jours en période de pointe hivernale.

Ainsi, 9 camions de 35 m³ devront approvisionner la chaufferie en plaquettes bois sur 4 jours en période hivernale pour garantir la disponibilité du combustible suffisant sur ces 4 jours plus 4 jours d'autonomie (soit 8 jours au total).

En période estivale, des livraisons de 1 camion par jour sont à prévoir.

II.4. Le potentiel disponible

La ressource

Les consommations annuelles de l'ensemble de la ZAC L'Arsenal (périmètre opérationnel) sont évaluées à 16,2 GWh/an.

Avec l'installation d'une première chaudière de 800 kW en phase 1 lors de la livraison des premiers bâtiments, puis d'une seconde de 700 kW (soit 1 500 kW installés) en phase 3, la couverture EnR est évaluée à 63%, le bois couvrira environ 10,2 GWh/an des besoins lorsque tous les bâtiments de la ZAC L'Arsenal seront raccordés.

Les consommations de plaquettes bois correspondantes sont de 2 800 tonnes par an, soit 10 800 m³/an.

Pour fournir les besoins de la ZAC, avec une couverture EnR supérieure à 60%, une chaudière plaquettes bois de 800kW est à installer en première phase, puis une deuxième chaudière de 700 kW lors des raccordements ultérieurs pour une puissance totale bois installée de 1,5 MW.

Un silo de stockage de 288 m³ est prévu afin de garantir une autonomie de 4 jours en période de pointe hivernale.

Ainsi, 9 camions de 35 m³ devront approvisionner la chaufferie en plaquettes bois sur 4 jours en période hivernale pour garantir la disponibilité du combustible suffisant sur ces 4 jours plus 4 jours d'autonomie (soit 8 jours au total).

En période estivale, des livraisons de 1 camion par jour sont à prévoir.

Les photographies suivantes montrent des camions bennes de 30 m³.



Ce scénario permet d'atteindre les objectifs fixés pour la ZAC. Le niveau d'investissements est compatible avec la programmation. **Ce scénario est retenu dans les solutions étudiées.**

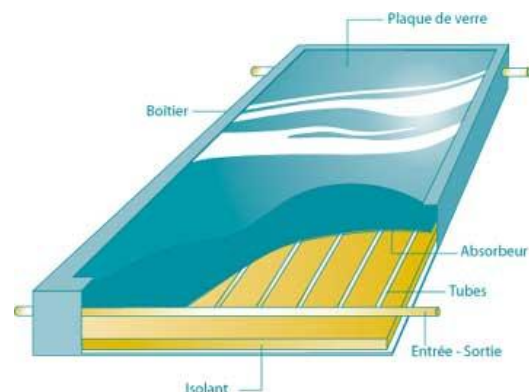
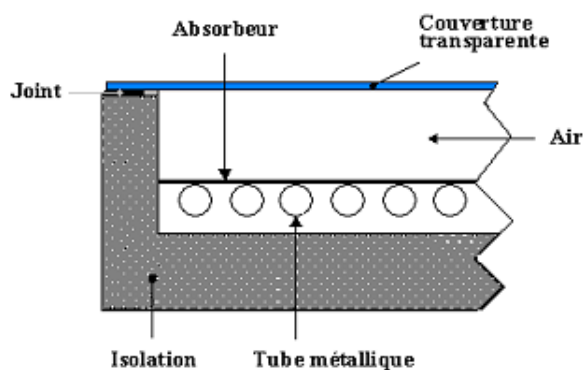
III. LE SOLAIRE THERMIQUE

III.1. Les technologies des capteurs solaires

Le capteur non vitré, utilisée essentiellement pour le chauffage des piscines (en France) ne sera pas étudié dans cette étude.

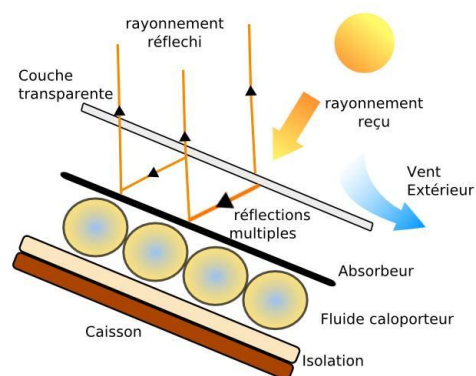
III.1.1. Le capteur vitré

Le capteur solaire à plan vitré est le type de capteur solaire thermique le plus répandu. Il utilise l'effet de serre pour capter l'énergie thermique du soleil. Ils sont composés d'un boîtier sous forme de coffre, d'un isolant en fond, d'un absorbeur de couleur noire en tubes de cuivre munis d'ailettes dans lequel circule le fluide caloporteur et d'une vitre.



Capteur vitré

La vitre transmet le rayonnement solaire mais pas celui émit par l'absorbeur. Les pertes thermiques par rayonnement et par convection du capteur sont donc réduites.



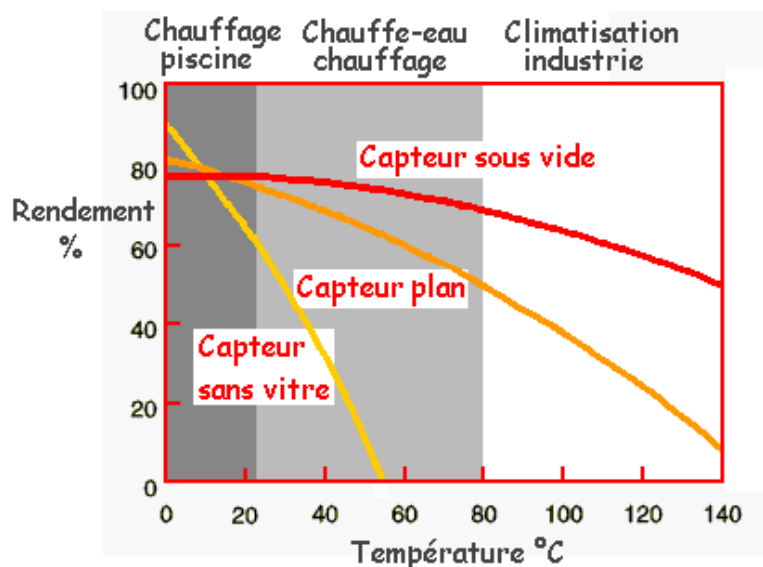
III.1.2. Le capteur sous vide



Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube, un absorbeur permet de capter le rayonnement solaire et un échangeur permet le transfert de l'énergie thermique.

Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et ce dernier reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement. Ainsi ces capteurs solaires sont performants sans une isolation thermique rapportée ou un coffre de protection.

A surface d'absorbeur égale, le rendement d'un capteur sous vide est meilleur que celui d'un capteur plan vitré, surtout à des températures élevées ($>60^{\circ}\text{C}$).



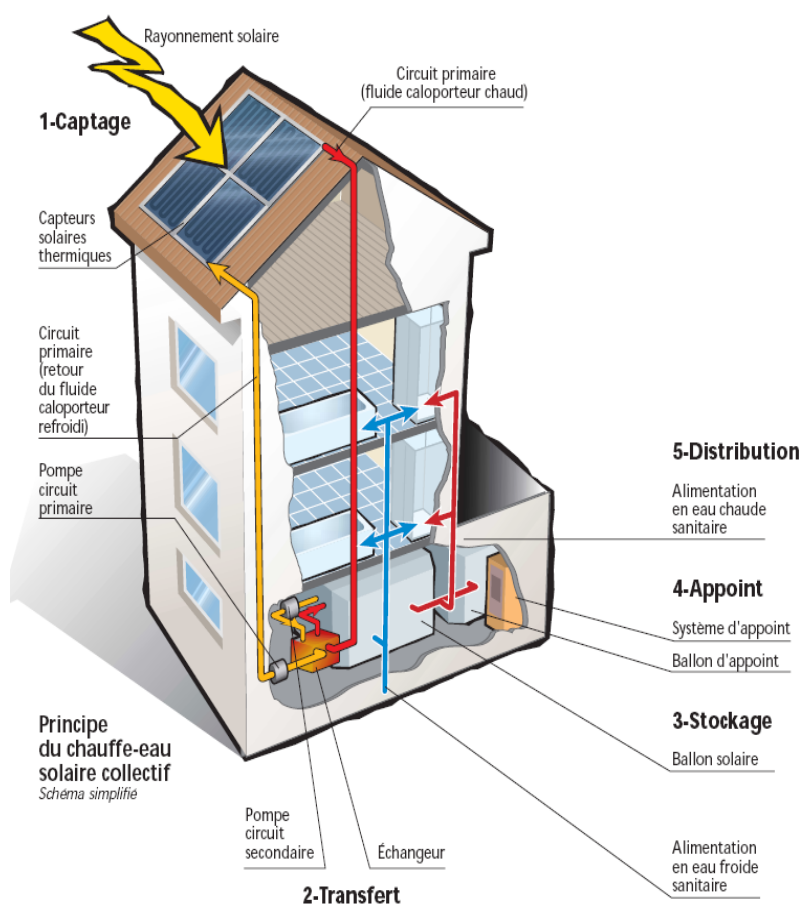
Comparaison des performances des différents types de capteur solaires

III.2. La production de chaleur

III.2.1. Le principe de fonctionnement

Des capteurs solaires convertissent le rayonnement solaire en chaleur et la communiquent au fluide caloporteur circulant dans les tubes des capteurs et le circuit primaire. Ce fluide protège le circuit capteur du gel et transfère la chaleur à l'eau sanitaire par l'intermédiaire d'un échangeur (externe dans les applications collectives).

Cette eau chaude est ensuite stockée dans un ballon « solaire », souvent disposé en série avec un ballon d'appoint (ou une installation de production d'eau chaude instantanée). Cet appoint est nécessaire pour garantir la température de consigne et la permanence de la fourniture d'eau chaude, puisque, pour des raisons économiques, une couverture totale des besoins annuels par le solaire n'est pas réaliste.

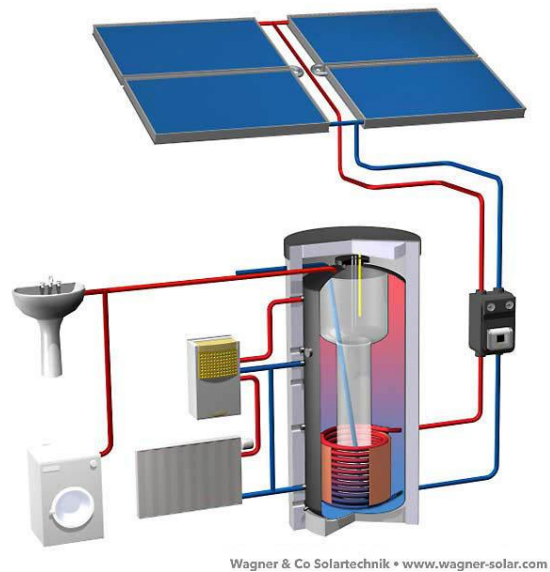


Dans les applications collectives, la circulation du fluide caloporteur est effectuée au moyen d'une pompe électrique. Son fonctionnement est contrôlé par un dispositif de régulation jouant sur les différences de températures : si l'eau des ballons est plus chaude que le fluide des capteurs, le régulateur stoppe le circulateur. Si elle est moins chaude, le circulateur se met en marche et le fluide primaire peut transmettre sa chaleur à l'eau stockée.

L'eau chaude produite à partir des panneaux solaires peut servir pour la couverture des besoins en eau chaude sanitaire des logements, mais également au chauffage de l'ensemble des bâtiments. En effet l'eau chaude stockée dans le « ballon solaire » peut également servir à l'alimentation des émetteurs de chaleur basse température.

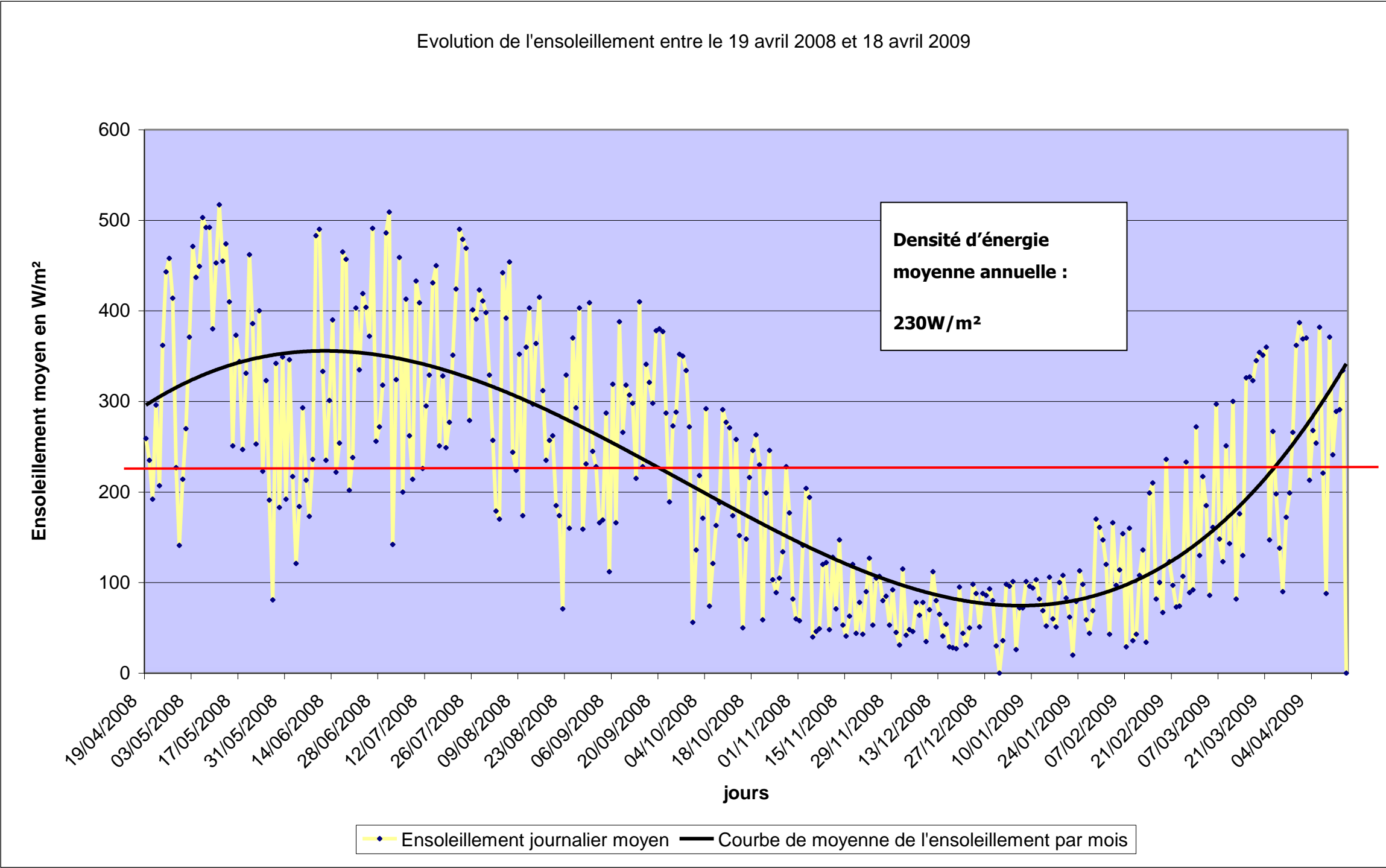
L'inclinaison des capteurs doit être de :

- 45° orienté au sud pour la production d'ECS,
- 60° par rapport à l'horizontale orientée au sud pour le chauffage des locaux. Cette inclinaison est conseillée pour favoriser les apports solaires en hiver, les rayons étant plus près du sol durant cette période.

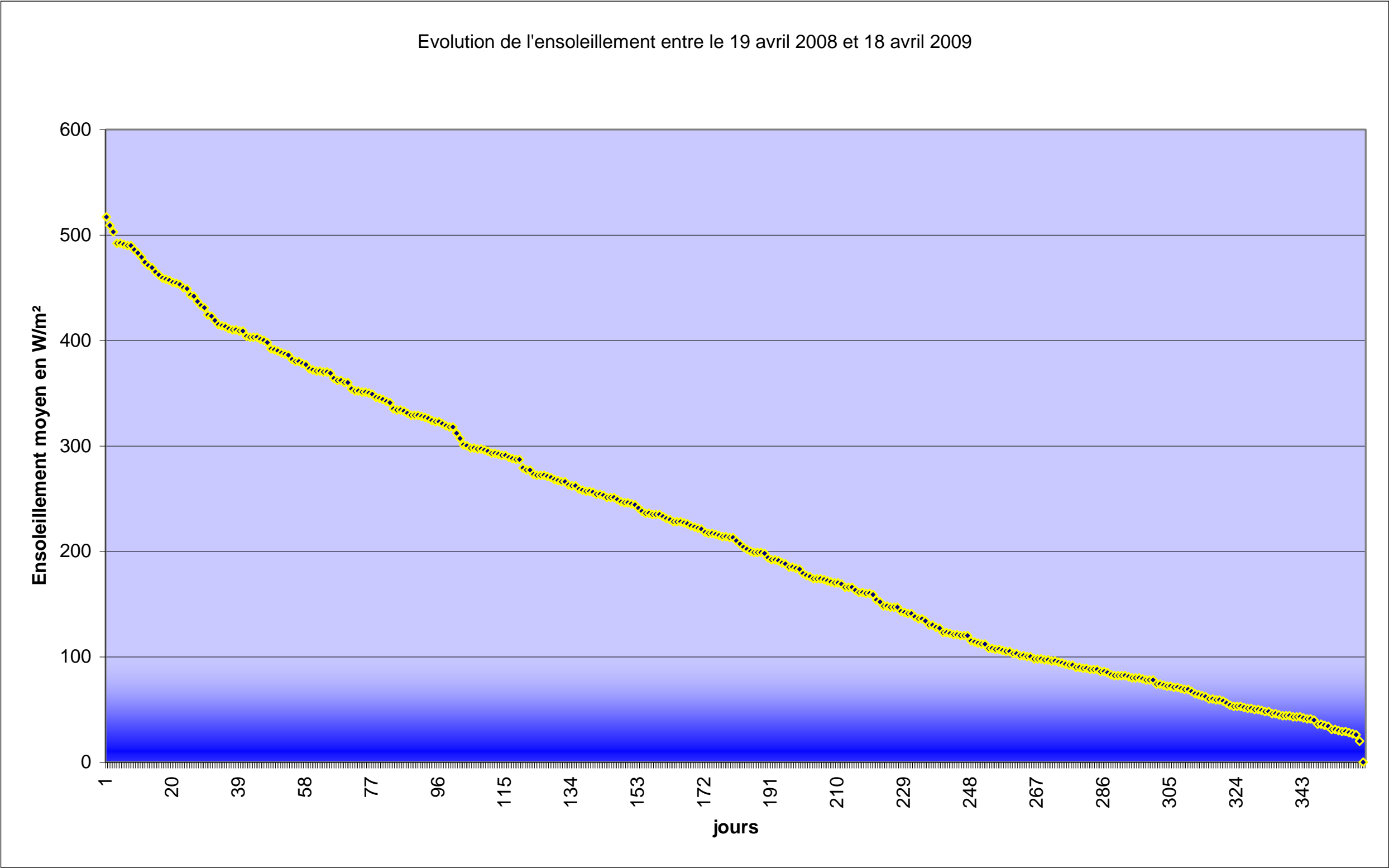


III.2.2. Le potentiel solaire à Rueil Malmaison

Les graphiques suivants présentent les valeurs journalières moyennes de l'ensoleillement⁵ dans le secteur du nord de Paris et la répartition décroissante de ces valeurs.



⁵ Source Météo France



Si nous prenons en compte l’installation de capteurs vitrés, la production moyenne observée en région parisienne est de 420 kWh/m²/an.

Si nous prenons en compte l'installation de capteurs vitrés, la production moyenne observée en région parisienne est de 420 kWh/m²/an.

Une distance devant être imposée entre deux rangés de panneaux solaires thermiques. Nous prendrons un taux de 50% de surfaces de panneaux solaires thermiques pouvant être installées par rapport aux surfaces de terrasse.

L'énergie récupérable par l'installation de panneaux solaires thermiques sur l'ensemble des toits des secteurs de la ZAC, en supposant des bâtiments en R+6, sauf équipements en R+1 est de 45%.

Néanmoins, la production solaire est maximale en été, lorsque les consommations sont les plus faibles (ECS seulement).

Le potentiel réel disponible est évalué à environ 25% des besoins de la ZAC.

Les investissements relatifs à la fourniture, la pose d'un panneau solaire thermique, et d'un ballon de stockage est de l'ordre de 850 à 1 100 €/m².

Les objectifs fixés pour la ZAC ne peuvent être atteints grâce à cette ressource. Ce scénario n'est pas retenu.

IV. LA RECUPERATION D'ENERGIE SUR LES EAUX USEES

IV.1. Principe de fonctionnement

Lors de leur évacuation, **les eaux usées ont une température moyenne comprise entre 10° et 20°C** (selon la région et les saisons). Les eaux usées comprennent les eaux issues des cuisines, des salles de bain, des lave-linges, des lave-vaisselles.

Les calories contenues dans ces eaux peuvent être utilisées pour le chauffage ou le refroidissement des bâtiments.

Des procédés novateurs permettent d'exploiter la chaleur des eaux usées pour la réintroduire dans les circuits de chauffage.

C'est le cas du procédé « Degrés Bleus » mis au point par la Lyonnaise des Eaux, filiale de Suez Environnement, ou du procédé ENERGIDO mis au point par Véolia.

Les eaux usées urbaines produites et rejetées par les bâtiments à usage d'habitation ou du secteur tertiaire sont collectées et transportées vers les installations de traitement situées en aval d'une agglomération. La collecte et le transport sont réalisés en systèmes unitaire ou séparatif.

Le principe de ces procédés est donc de récupérer la chaleur résiduelle des effluents au travers d'échangeurs de chaleur et d'en améliorer leur enthalpie (énergie calorifique) par l'utilisation d'une pompe à chaleur.

Les pompes à chaleur permettent, avec un apport d'énergie extérieure (électricité, gaz) de valoriser des fluides basses températures (l'eau usée en l'occurrence) en augmentant leur potentiel énergétique. La chaleur ainsi générée peut être livrée dans des bâtiments ou des réseaux de chaleur.

Procédé « Degrés Bleus »

La technologie Degrés Bleus repose sur un échangeur placé au fond des canalisations d'eaux usées. Cet échangeur va permettre de récupérer les calories des eaux usées et les transférer à un fluide caloporteur. Ce fluide alimente une pompe à chaleur qui va permettre le chauffage des bâtiments.

L'échangeur de chaleur est constitué de plaques en inox qui permettent de transférer les calories des eaux usées au fluide caloporteur qu'il contient. Il garantit la séparation du réseau de chauffage et de celui des eaux usées.

Le fluide caloporteur récupère les calories des eaux usées et les achemine jusqu'à la pompe à chaleur. Il circule en boucle fermée de l'intérieur des échangeurs à la pompe à chaleur. Il est constitué d'eau glycolée. Sa température passe de 4°C à 8°C au contact de l'échangeur.

La pompe à chaleur va démultiplier les calories prélevées et élever la température jusqu'à ce qu'elle soit suffisante (entre 50 et 70°) pour le chauffage des bâtiments.

La ville de Levallois a été la première collectivité de France à s'équiper de ce procédé. Il permet de maintenir en température l'eau des bassins du nouveau Centre Aquatique de la Ville.

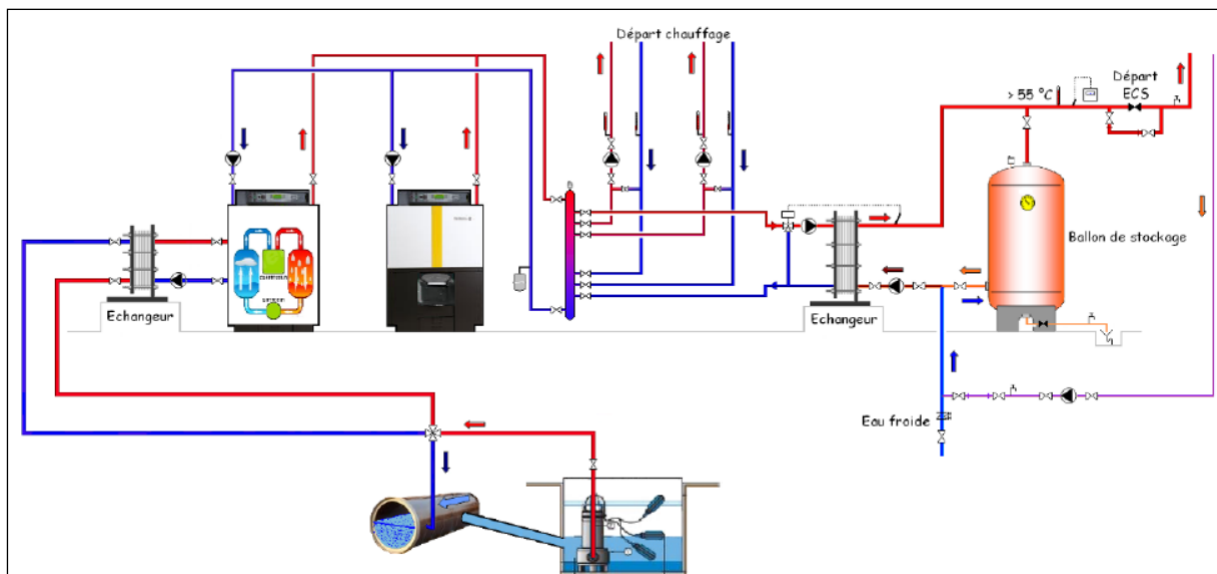
Procédé « Energido »

La chaleur est récupérée sur le réseau de collecte ou de transport des effluents par la mise en place d'une dérivation totale ou partielle du flux des effluents bruts vers un échangeur déporté (ex-situ).

Le système de récupération de chaleur se décompose en plusieurs éléments indissociables :

- Un ouvrage de dérivation des eaux usées provenant du réseau unitaire ou séparatif. Le flux est capté à l'aide d'un regard à créer.
- Le flux capté est dirigé vers une chambre de relevage à créer. Si une chambre de relevage est déjà existante, le projet peut en être simplifié.

- L'effluent est aspiré par un broyeur et une pompe afin de le rendre compatible avec l'échangeur.
- Une boucle d'eau usée ouverte équipée d'un éventuel jeu de vannes pour inverser le sens de circulation de l'effluent à l'intérieur de l'échangeur afin de le décolmater. L'effluent est rejeté dans le collecteur en aval du point de dérivation.
- Un échangeur déporté équipé d'un ensemble de vannes permettant son nettoyage. Il assure le transfert thermique de la boucle d'eaux usées à la boucle fermée de transfert d'eau intermédiaire rejoignant la PAC.
- Une pompe ou un ensemble de pompes à chaleur (PAC)
- Un système complémentaire d'appoint éventuel pour :
 - Augmenter les températures de livraison suivant les conditions de température répondant aux besoins du consommateur de chaleur (pointe ou production ECS)
 - Garantir les conditions de livraison de chaleur
- Un circuit de distribution de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS)
- Un local permettant d'installer les échangeurs et la PAC ainsi que les organes annexes de régulation ou d'appoint.



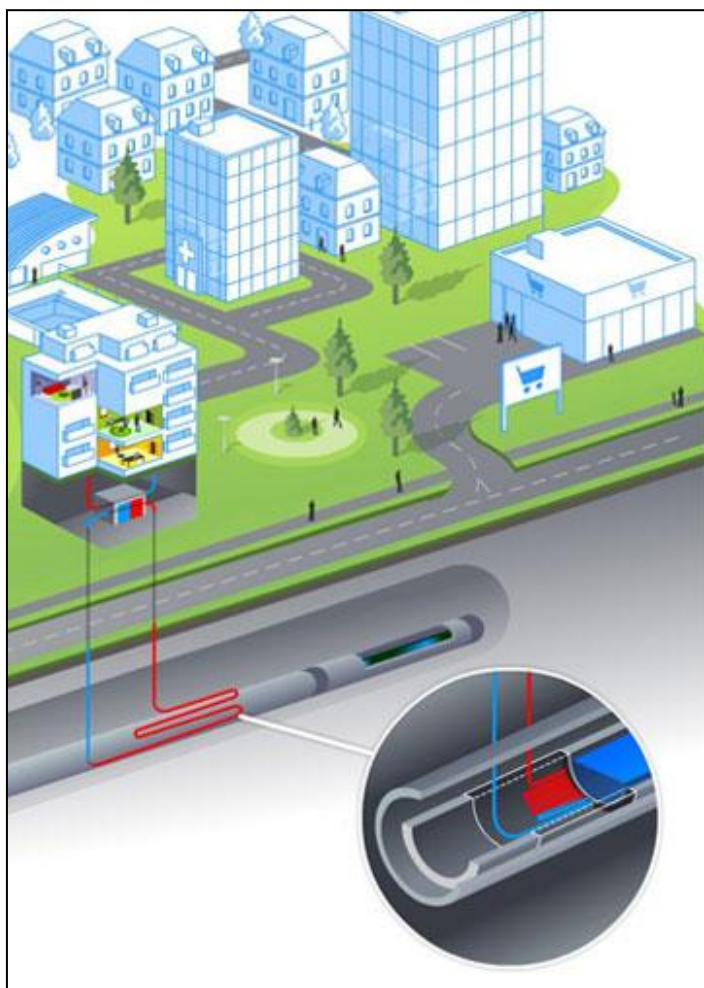
Les sites où il peut être intéressant d'installer ce type de procédés doivent, dans la mesure du possible, répondre aux caractéristiques suivantes :

- Proximité géographique entre un collecteur d'eaux usées et les consommateurs de chaleur pour limiter les linéaires de canalisations de raccordement.
- Utiliser les ouvrages de captage existants, chambre existante ou vérifier la faisabilité de construction d'une chambre de dérivation et de pompage des effluents.
- Sélectionner des sites consommateurs de chaleur à basse énergie (si possible toute l'année) avec une température de service courante ne dépassant pas 50/65°C sauf à utiliser une chaudière d'appoint pour obtenir la température requise lors des pointes de consommation.
- Disposer d'effluents ayant des températures et débit relativement stables.

De la même façon que pour la géothermie sur nappe, la récupération de chaleur sur eaux usées nécessite l'installation d'une PAC pour multiplier les calories prélevées et augmenter la température jusqu'à une température suffisante pour les besoins de chauffage et d'ECS.

L'installation d'une PAC étant plus appropriée pour des puissances pas trop importantes et pour le chauffage de bâtiment neufs disposant de planchers chauffants ou de radiateurs basse température, cette technologie a été écartée (bien qu'il existe désormais des PAC fonctionnant avec des températures élevées).

IV.2. Potentiel disponible à Rueil-Malmaison



Si ce système peut alimenter tout type de bâtiment, notamment ceux consommateurs en énergie, comme les piscines, les hôpitaux ou les maisons de retraite, une condition de faisabilité primordiale est que le débit qui s'écoule dans la canalisation doit être supérieur ou égal à 15 litres par seconde (par temps sec), soit l'équivalent d'un bassin de 8 000 habitants raccordés.

D'autre part, plus le bâtiment est proche de la canalisation, plus la récupération de chaleur est avantageuse. Une distance de 100 à 300 mètres entre le système de récupération et le système de production est donc recommandée

Il est donc particulièrement adapté au milieu urbain dense.

La puissance pouvant être installée est de 1,8 à 8,4 kW par mètre linéaire de canalisation.

IV.3. Energie récupérable et investissements

En supposant l'existence d'un réseau d'eaux usées à proximité de la ZAC, pour un débit moyen de 15 litres/seconde (soit $54 \text{ m}^3/\text{h}$), la puissance disponible est de 300 kW environ. L'énergie récupérable est de 2 740 MWh.

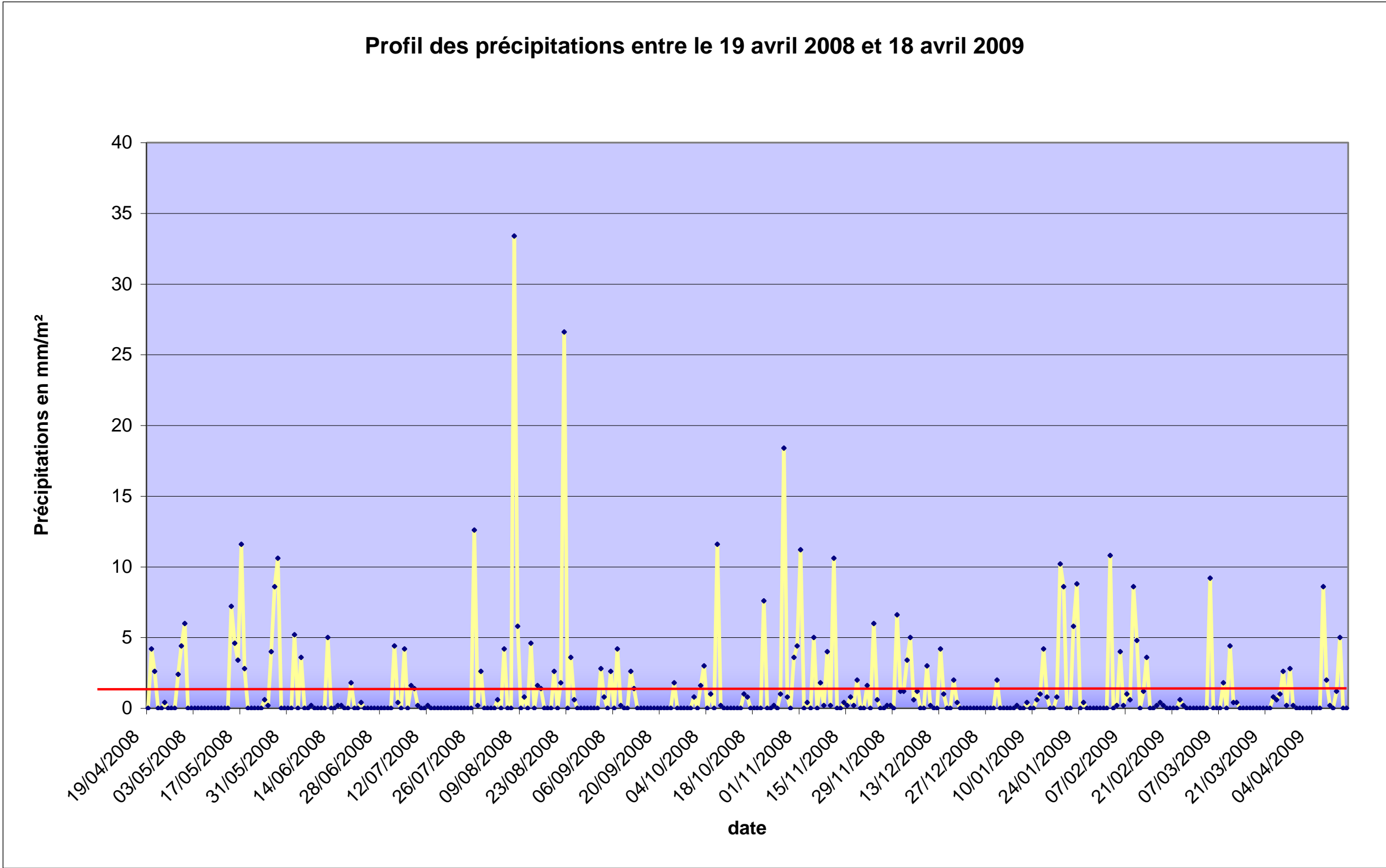
Avec une PAC de COP moyen annuel 3,5, la quantité d'énergie produite à partir de ce système sera de 3 800 MWh/an.

La couverture des besoins de chaleur de la ZAC L'Arsenal à partir d'EnR&R est dans ce cas de 17%.

En ce qui concerne les investissements pour ce système énergétique, une approche globale (canalisations, échangeurs, PAC) permet d'estimer les investissements à 1.100 € / kW.

Néanmoins, aucun réseau d'eaux usées de diamètre conséquent n'existe à proximité de la ZAC et ne permet de satisfaire à l'hypothèse de 15 litres/secondes. Cette ressource n'existe pas à proximité de la ZAC et ne permet pas d'atteindre les objectifs fixés. Ce scénario n'est pas retenu.

Le graphique suivant présente les valeurs journalières moyennes des précipitations dans le secteur du nord de Paris. **La valeur moyenne journalière est de 1,32 mm/m².**



V. SCENARIOS DE PRODUCTION D'ENERGIE POUR LA ZAC

V.1. Hypothèses générales

Les scénarios décrits ci-dessous et en particulier les évaluations économiques des scénarios s'appuient sur des hypothèses technico-économiques.

Les hypothèses suivantes sont communes à l'ensemble de ces scénarios :

- Il a été considéré pour l'ensemble des scénarios (excepté pour le scénario de référence – gaz collectif) que les premiers investissements étaient à réaliser en phase 1 et les extensions en phase 3
- La durée d'amortissement choisie pour les premiers investissements est de 24 ans
- La durée d'amortissement pour les extensions est de 22 ans

Le tableau suivant présente les hypothèses retenues pour les scénarios étudiés :

Hypothèses générales de l'étude		
Hypothèses	Valeur	Unité
Consommations de chauffage RT 2012		
<i>Modulation du Cepmax en cas de raccordement à un réseau vertueux</i>	20%	
<i>Logements</i>	36	kWh _{EP} /m ² /an
<i>Bureaux</i>	30	kWh _{EP} /m ² /an
<i>Commerces</i>	30	kWh _{EP} /m ² /an
<i>Equipements</i>	36	kWh _{EP} /m ² /an
Consommations d'ECS RT 2012		
<i>Logements</i>	30	kWh _{EP} /m ² /an
<i>Bureaux</i>	0	kWh _{EP} /m ² /an
<i>Commerces</i>	0	kWh _{EP} /m ² /an
<i>Equipements</i>	12	kWh _{EP} /m ² /an
Besoins de froid des bureaux		
<i>Consommations de froid des bureaux</i>	30	kWh _{EP} /m ² /an
Hypothèses économiques		
<i>Premiers investissements en phase 1 : 2019</i>		
<i>Extensions en phase 3 : 2021</i>		
<i>Taux emprunt</i>	6%	
<i>Droits de raccordement</i>	120	€ HT/kW
Rendements		
<i>Réseau</i>	93%	
<i>Réseau eau tempérée</i>	95%	
<i>Chaudières bois</i>	87%	
<i>Chaudières Gaz</i>	90%	
<i>Conversion PCI/PCS gaz</i>	0,9	

Hypothèses générales de l'étude		
Hypothèses	Valeur	Unité
Hypothèses géothermie		
<i>COP (coefficient de performance)</i>	3,5	
<i>Delta T production de chaud</i>	6,5	°C
<i>EER (coefficient d'efficacité frigorifique)</i>	5	
<i>Delta T production de froid</i>	10	°C
Coût des énergies		
<i>Coût de la plaquette bois</i>	23,00	€ HT/MWh PCI
<i>Coût du granulé bois</i>	200,00	€ HT/tonne
<i>Prix gaz tous scénarios sur réseau</i>		
<i>Coût du combustible gaz par MWh PCI gaz (prix marché gaz dérégulé au 01/04/2015)</i>	25,00	€ HT/MWh PCI
<i>Prix gaz scénario chaufferies par îlot</i>		
<i>Tarif B2I -10% au 01/04/2015</i>		
<i>Abonnement B2I</i>	183,84	€ HT/an
<i>Coût du MWh B2I</i>	43,30	€ HT/MWh
<i>Tarif vert TLU achat électricité</i>	85,00	€ HT/MWh
Logements		
<i>Logement -type (source AMORCE)</i>	70	m ²
<i>Immeuble moyen (source AMORCE)</i>	25	logements
Niveaux d'aides (source méthode de calcul Fonds chaleur ADEME)		
<i>Scénarios bois</i>	24%	
<i>Scénarios géothermie</i>	23 à 26%	

V.2. La programmation

Le projet de ZAC L'ARSENAL est un projet d'aménagement pluriannuel avec une mixité des usages. Ce projet prévoit dans le périmètre de la ZAC L'ARSENAL :

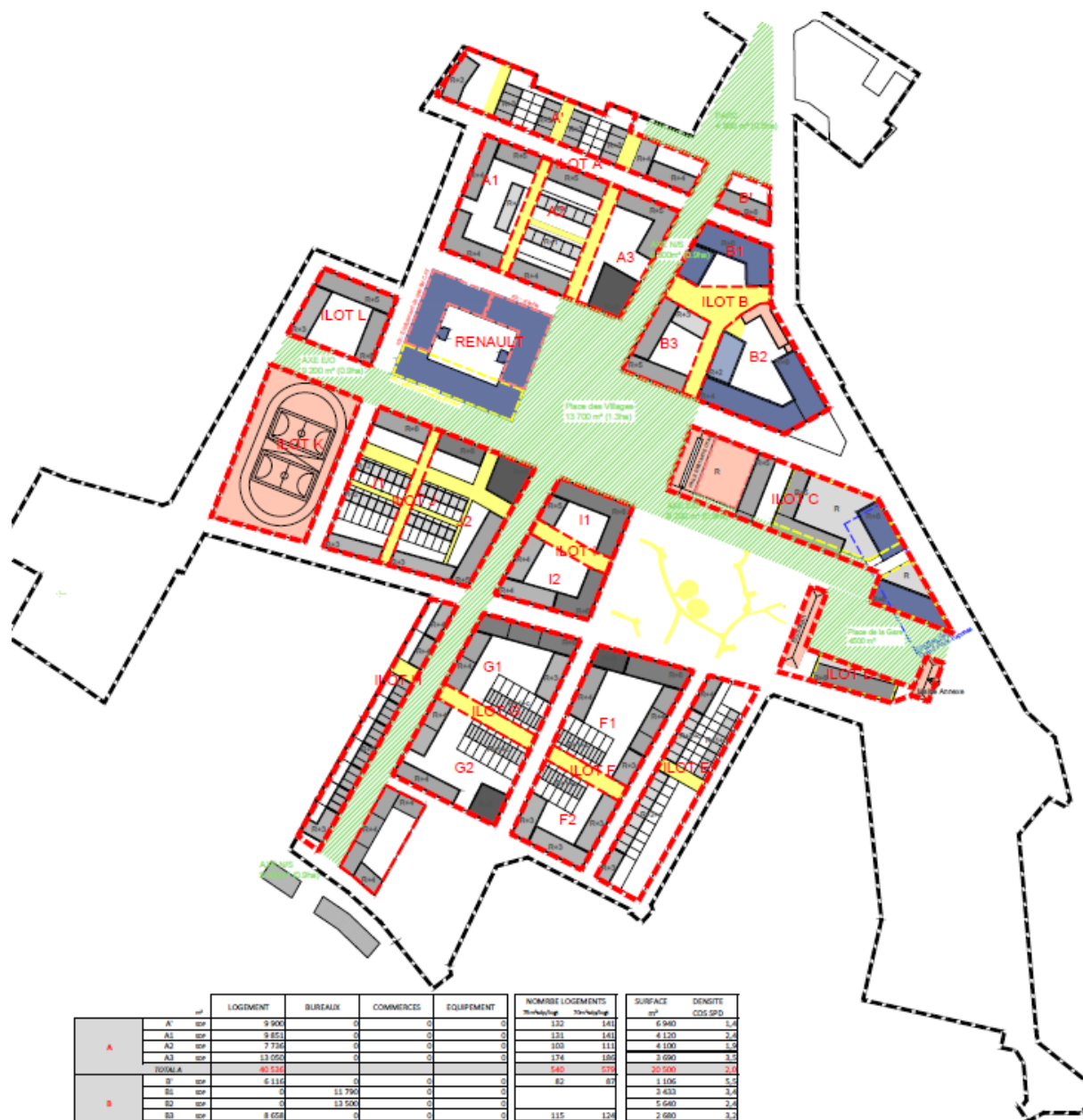
- 187 480 m² de logements
- 35 250 m² de bureaux
- 11 170 m² de commerces
- 25 525 m² d'équipements

Le tableau suivant présente les surfaces des bâtiments prévus par date phase d'aménagement et par zone îlot.

		Date Travaux		SHON Totale	SHON (m²)			
Phases	Ilôts	Début	Fin		Logements	Activités		Equipe- ments
						Bureaux	Commerces	
Phase 1	H	2016	2019		8 379			
	G				24 323			
	F				23 496			
	E1				4 882			
TOTAL Phase 1				72 655	61 080			11 600
Phase 2	K	2017	2019-2020					9 500
	J				26 100			
	C1				2 267			
		RENAULT	2017	2019			2 000	525
				48 492	28 367	0	10 100	10 025
Phase 3	A1	2018	2021		9 851	11 790 13 500		
	A2				7 736			
	A3				13 050			
	B1							
	B2					1 071	0	
	B3				8 658			
	D				4 779			
	L				9 702			
	I		19 040					
			99 177	72 816	25 290	1 071	0	
Phase 4	A'	2019	2021-2025		9 900	9 963		
	B'				6 116			
	C2				6 801			
	E2				2 404			
				39 084	25 221	9 963	0	3 900
	Total			259 409	187 484	35 253	11 171	25 525

Les données de surface du tableau précédent sont issues du document de programmation datant du 19 décembre 2014 pour les bâtiments à usages de logements, bureaux et commerces.

Ce document est joint ci-dessous avec la localisation des îlots :



		LOGEMENT	BUREAUX	COMMERCES	EQUIPEMENT	NOMBRE LOGEMENTS		SURFACE	DENSITE
						Surf. Hab.	Surf. Equip.	CDG SPD	
A	A1	9 900	0	0	0	132	140	6 940	1,4
	A2	9 851	0	0	0	131	140	4 120	2,4
	A3	7 734	0	0	0	100	111	4 100	1,0
	A3	13 050	0	0	0	174	186	2 690	3,0
	TOTAL A	40 535	0	0	0	540	578	20 850	2,8
B	B1	6 114	0	0	0	82	87	3 100	5,2
	B2	0	11 790	0	0	115	124	3 433	3,4
	B3	0	13 500	0	0	115	124	5 640	2,4
	B3	8 658	0	0	0	115	124	2 680	3,0
	TOTAL B	14 772	25 290	0	0	312	335	11 843	2,8
C	C	9 068	9 963	8 100	3 060	121	130	10 540	2,0
	TOTAL C	9 068	9 963	8 100	3 060	121	130	10 540	2,0
D	D	4 774	0	1 071	1 054	64	68	2 855	2,0
	TOTAL D	4 774	0	1 071	1 054	64	68	2 855	2,0
E	E	7 284	0	0	0	97	104	8 530	1,1
	TOTAL E	7 284	0	0	0	97	104	8 530	1,1
F	F1	16 354	0	0	0	218	234	6 180	2,4
	F2	7 144	0	0	0	96	102	3 670	1,9
	TOTAL F	23 498	0	0	0	314	336	10 850	2,0
G	G1	12 851	0	0	0	171	183	5 280	2,4
	G2	11 124	0	0	0	154	165	5 315	2,5
	TOTAL G	24 975	0	0	0	325	348	10 595	2,0
H	H	8 379	0	0	0	112	120	4 915	2,0
	TOTAL H	8 379	0	0	0	112	120	4 915	2,0
I	I1	9 413	0	0	0	125	134	2 400	3,4
	I2	9 621	0	0	0	128	138	3 000	3,5
	TOTAL I	19 034	0	0	0	253	272	5 400	3,0
J	J1	7 602	0	0	0	101	109	4 680	1,4
	J2	18 492	0	0	0	247	264	7 070	2,4
	TOTAL J	26 094	0	0	0	348	373	11 750	2,0
K	K	0	0	0	11 520			8 580	1,4
	TOTAL K	0	0	0	11 520			8 580	1,4
L	L	9 702	0	0	0	129	139	2 434	2,0
	TOTAL L	9 702	0	0	0	129	139	2 434	2,0
RENAULT	RENAULT	0	0	2 000	3 000				
	POMPIER	4 788	0	0	0	81	87		
HORS BILAN		6 107	0	0	0				
TOTAL		187 481	35 250	9 171	15 638	2 500	2 678	112 442	2,0

Les équipements pris en compte dans la programmation sont présentés dans le tableau suivant, avec les hypothèses de consommations :

Nom équipement	Phase	Date mise en service	Surface (m ²)	Existant ou neuf	Donnée de consommation ville (chauffage + ECS) en kWh _{EP} /m ² /an	Hypothèse utilisée ratio de consommation en kWh _{EP} /m ² /an
Groupe scolaire ROBESPIERRE	1	2018	7 000	Existant	36	42
Groupe scolaire ROBESPIERRE	1	2018	3 000	Neuf		42
Gymnase Bons raisins	1		1 600	Existant		42
Equipements îlot K (cf programmation 19/12/14)	2	2020	9 500	Neuf		42
Piscine	2	2020	Bassin 525 m2	Neuf		2 400
Crèche 120 berceaux (bons raisins)	4		2 000	Neuf (reconstruction)		52
Mairie de Village	4		200	Neuf		34
Salle communale	4		200	Neuf		34
Club de jeunes	4		200	Neuf		34
Centre d'aide au travail	4		1 300	Neuf		30
Surface totale			25 525			

V.3. Rappel des besoins

Le tableau suivant présente la synthèse des besoins de la ZAC, tout au long des 4 phases, sur le périmètre opérationnel seulement. Il s'agit des consommations correspondant aux surfaces indiquées dans le tableau au paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Les besoins en production de chaleur (chauffage et ECS) pour l'ensemble du périmètre de la ZAC sont de 16 180 MWh/an.

La puissance appelée s'élève à près de 9 MW. La puissance à installer en énergies renouvelables est de 1,5 MW.

En première approche, le nombre de sous-stations est évalué à 36 pour un réseau de chauffage urbain de 2 200 ml environ.

	Consommations en MWh/an			Puissance maximale appelée			Puissance EnR	Nombre Sous-stations
	Chauffage	ECS	Total	Chauffage	ECS	Total		
Phase 1	2 610	1 971	4 581	1,6	0,9	2,5	0,8	9
Phase 2	2 809	1 065	3 874	3,3	1,4	4,7	0,8	15
Phase 3	3 412	2 184	5 597	5,2	2,4	7,6	1,5	28
Phase 4	1 324	803	2 127	6,0	2,8	8,7	1,5	36
TOTAL	10 156	6 024	16 180	6,0	2,8	8,7	1,5	36

Principales données sur la ZAC

Concernant le choix des ratios de consommations par unité de surface, un coefficient correcteur a été appliqué aux ratios de la RT2012. En effet, les calculs réglementaires restent assez théoriques. Ils concernent la consommation totale des bâtiments et plusieurs hypothèses de départ de ces calculs s'avèrent inexactes. A ce propos l'AMORCE a émis un avis lors des 10^{ème} rencontres des Réseaux de chaleur que nous reportons ci-dessous :

Majoration des consommations théoriques pour tenir compte des niveaux de confort réels constatés :

- En collectif : 22°C au lieu de 19°C
35 m³ECS/an au lieu de 24 m³ECS/an
→ **+ 50% sur la conso théorique**
- En individuel : 20,5°C au lieu de 19°C
29 m³ECS/an au lieu de 24 m³ECS/an
→ **+ 20% sur la conso théorique**

Nous avons donc en première approche préféré modéliser les consommations énergétiques des bâtiments selon les ratios de consommation réellement observés à ce jour en ne tenant compte que chauffage et l'eau chaude sanitaire. Ces chiffres sont résumés dans le tableau ci-dessous. Ils sont également reportés dans le tableau des hypothèses au paragraphe V.1 :

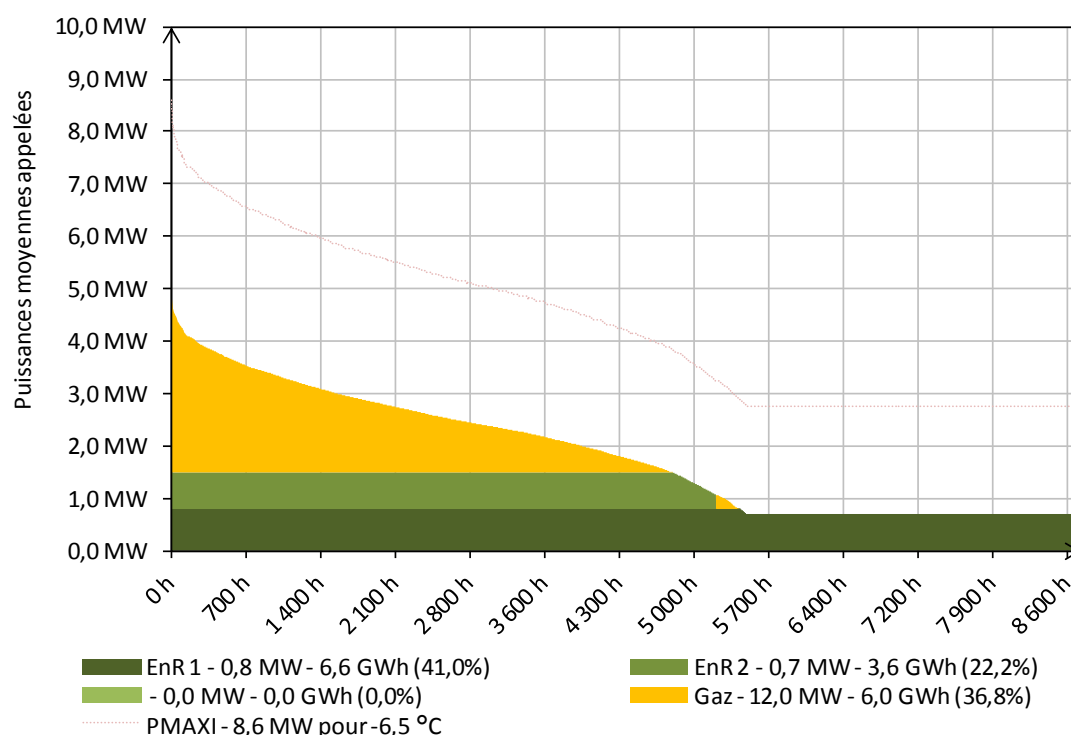
Typologie du bâtiment	Ratio consommation en énergie primaire [kWh _{ep} /m ² /an]	
	Chauffage	ECS
Logements	36	30
Bureaux	30	0
Equipements	30	12
Commerces	30	0

Le tableau suivant indique le détail des besoins par typologie de bâtiments et par phase :

	Périmètre opérationnel																		
Ilôts	Date Travaux		SHON Totale	SHON (m²)			Conso d'EP chauffage en MWh/an				Conso d'EP ECS en MWh/an				TOTAL besoins bâtiments (MWh/an)	TOTAL Consommation y compris pertes réseau	Puissances		
				Logements	Activités		Equipe-ments	Logements	Activités		Equipe-ments	Logements	Activités				Equipe-ments	Pmax chauffage	Pmax ECS
	Bureaux	Commerces			Bureaux	Commerces			Bureaux	Commerces									
H	2016	2019	72 655	61 055	-	-	11 600	2 198			413	1 832	-		139	4 581	4 926	1,61	0,90
G																			
F																			
E1																			
K	2017	2019-2020	45 967	28 367	-	8 100	9 500	1 021		243	285	851	-		114	2 514	2 703	3,29	1,39
J																			
C1																			
RENAULT																			
A1	2017	2019	2 525	-	-	2 000	525	-	-	60	1 200	-	-		100	1 360	1 462		
A2																			
A3																			
B1																			
B2	2018	2021	99 177	72 816	25 290	1 071	-	2 621	759	32	-	2 184	-	-		5 597	6 018	5,18	2,38
B3																			
D																			
L																			
I	2019	2021-2025	39 084	25 221	9 963	-	3 900	908	299	-	117	757	-	-	47	2 127	2 287	5,96	2,75
A'																			
B'																			
C2																			
E2	Total		259 409	187 460	35 253	11 171	25 525	6 749	1 058	335	2 015	5 624	-	-	400	16 180	17 397	6	2,8
											10 156				6 024	16 180	17 397		

La monotone des besoins est représentée sur le graphe suivant. Une hypothèse de couverture des besoins par deux systèmes EnR de 700 kW et 800 kW a été utilisée dans ce cas. L'appoint est fourni par des chaudières gaz.

Monotone des appels de puissance moyens sur le Futur réseau de chaleur - ZAC Mont-Valérien - Rueil-Malmaison
Scénario : EnR 1,5 MW + appoint/secours gaz 12 MW - Part EnR : 63,2% (référence : année 2013)



V.4. Scénario 1 – Scénario bois énergie

V.4.1. Descriptif technique

Centrale de production

La production de chaleur est assurée par une chaufferie bois et une chaufferie appoint secours gaz. Pour l'ensemble de la ZAC, la puissance bois installée est de 1 500 kW. La puissance gaz appoint/secours installée est de 12 000 kW.

La surface nécessaire pour la chaufferie bois avec appoint gaz est de 310 m² environ pour le bâtiment chaufferie. Une surface supplémentaire de 75 m² est nécessaire pour le silo de stockage bois.

Réseau

Un réseau de chauffage urbain basse température est créé pour alimenter l'ensemble des îlots de la ZAC.

La longueur de réseau à créer est de 2 200 ml environ (longueur de tranchée).

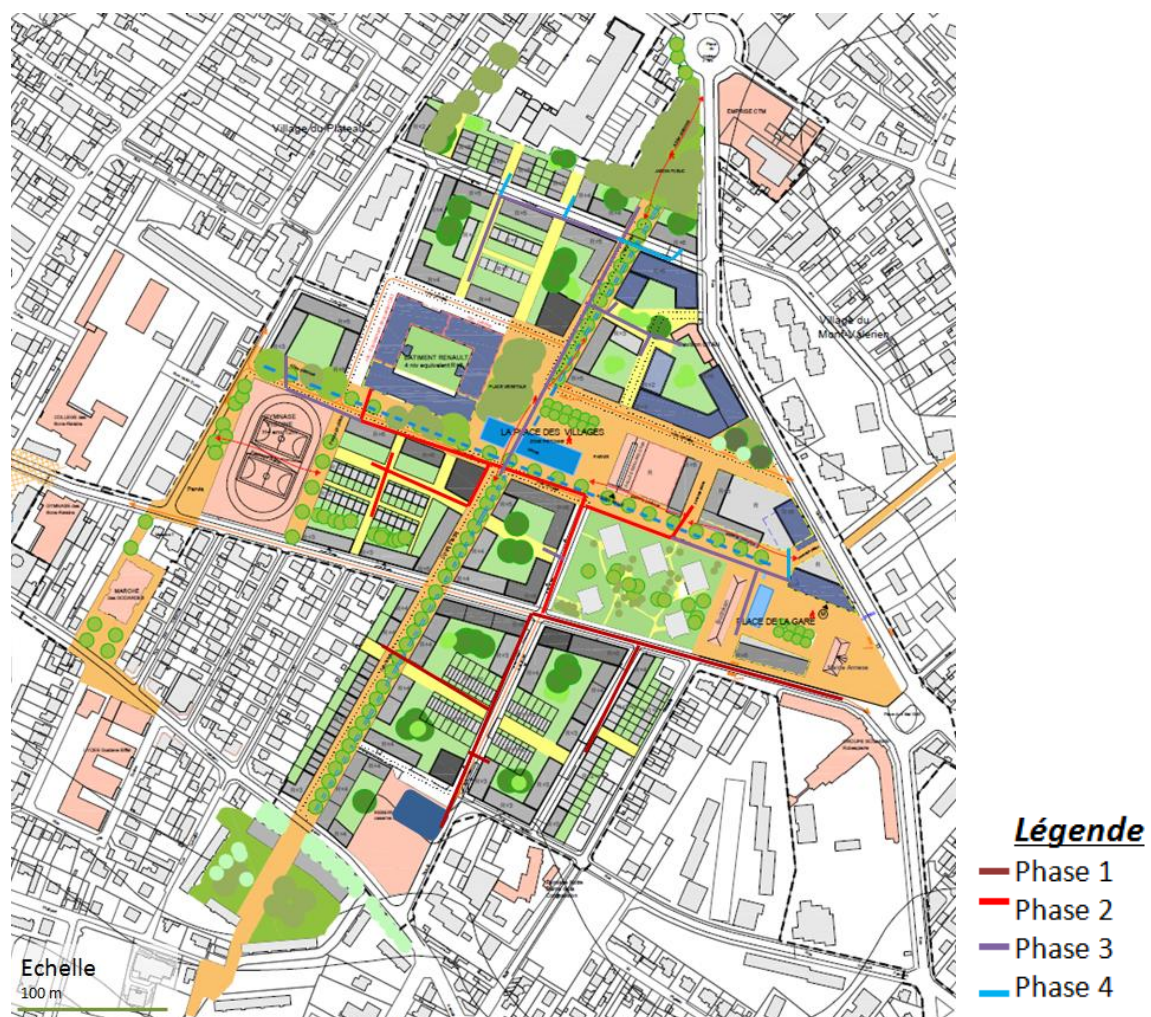
Le réseau prévu est un réseau basse température (départ primaire à 70°C environ).

Sous-stations

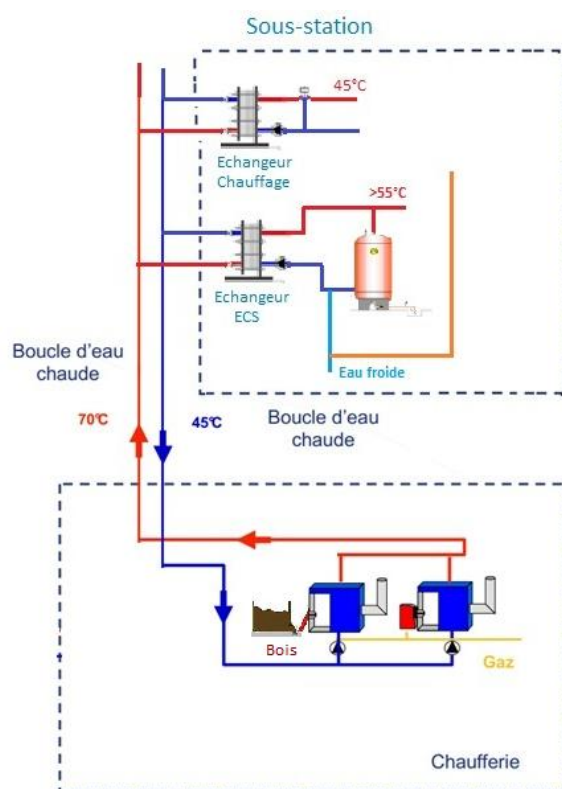
Les sous-stations sont créées en pied d'immeuble pour la distribution de chaleur.

Une solution avec 36 sous-stations de distribution a été étudiée.

Un local sera à disposition pour installer les équipements (poste de livraison).



Le schéma de fonctionnement de ce scénario est le suivant :



V.4.2. Evaluation économique

Hypothèses

Le rendement chaudière bois est évalué à 87%

Le prix de la plaquette bois est évalué à 23,00 € HT/MWh PCI

Les aides

Le calcul du niveau d'aide est basé sur la méthode de calcul du fonds chaleur.

En cas de réalisation de chaufferie biomasse avec création de réseau de chaleur, l'aide est calculée globalement « chaufferie + réseau ».

Pour les chaufferies biomasse, le montant minimum d'aide est de 750 000 € et le plafond est de 1 200 000 € HT.

Le réseau bénéficie de subventions à hauteur de 200 €/ml, plafonné à 500 000 €.

Ainsi, le plafond pour le présent projet, avec 2 200 ml de réseau s'élève à

$$1\,200\,000 + 200 \times 2\,200 = 1\,700\,000 \text{ €}$$

Le minimum d'aide est de $750\,000 + 200\,000 = 950\,000 \text{ €}$

Evaluation des coûts sur une durée de 24 ans

Le prix de la chaleur du scénario 1 – Chaufferie bois avec gaz appoint/secours est évalué à environ 77,2 € TTC/MWh sur 24 ans, sans subvention.

Avec un niveau de subvention moyen, le prix de la chaleur est évalué à 69,3 € TTC/MWh.

Le montant des investissements liés à ce scénario se répartit ainsi :

Investissements		
Process	2 254	k€ HT
Réseau	2 469	k€ HT
Sous-stations	744	k€ HT
Total	5 467	k€ HT

Les investissements liés au process comprennent les postes suivants :

- Installation d'une chaudière bois 800 kW et une chaudière bois 700 kW
- Un silo de stockage d'une capacité de 4 jours de combustible en période de pointe
- Le bâtiment chaufferie pour le process bois
- Installation de deux chaudières gaz appoint/secours de 6 MW de puissance unitaire
- Le bâtiment chaufferie gaz
- L'accès à la chaufferie depuis la voirie



Scénario plaquettes bois																								
2 chaudières bois (800 kW et 700 kW)																								
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Ventes (MWh)	4 581	8 456	14 052	14 584	15 116	15 648	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180
Puissance souscrite sur réseau (kW)	2 508	4 683	7 560	7 848	8 135	8 422	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710
Taux EnR&R	72%	62%	70%	68%	68%	67%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%
Production (MWh utile)	4 926	9 092	15 110	15 682	16 254	16 826	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397
Consommations Bois (MWh utile)	3 562	5 637	10 525	10 664	11 052	11 273	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999	10 999
Consommation Gaz (MWh utile)	1 365	3 455	4 585	5 018	5 201	5 552	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398
Consommations Bois (MWh PCI)	4 094	6 479	12 098	12 257	12 704	12 958	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643	12 643
Consommation Gaz (MWh PCI)	1 516	3 839	5 094	5 576	5 779	6 169	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109
Consommation Gaz (MWh PCS)	1 685	4 265	5 660	6 195	6 421	6 855	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899
R1 (k€ HT) - Part variable	132	245	406	421	437	452	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469
R2 (k€ HT) - Part fixe (abonnement)																								
R21 - Dépenses électricité (k €HT)	14	24	42	44	45	46	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
R22 - Entretien courant (k€ HT)	70	70	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109
R23 - Gros entretien et renouvellement (k€ HT)	35	35	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
R24 : Annuités d'amortissement	-20	19	97	408	408	408	408	442	442	442	442	442	442	442	442	442	442	442	442	442	442	442	442	442
Droits de raccordements (k€ HT)	301	261	345	34	34	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dépenses liées au R1 (k€ HT)	132	245	406	421	437	452	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469	469
Dépenses liées au R2 (k€ HT)	99	149	303	615	617	618	618	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653	653
Total des dépenses (k € HT)	231	394	709	1 037	1 053	1 070	1 087	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121	1 121
Total des recettes (k € HT)	250	426	766	1 119	1 138	1 156	1 174	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211	1 211
Résultat BRUT (k €HT)	19	32	57	83	84	86	87	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Prix moyen chaleur sans subvention	77,21	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions mini	70,31	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions moyenne	69,22	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions maxi	68,14	€ TTC/MWh																						

V.5. Scénario 2 – PAC centralisée sur nappe – (scénario très optimiste)

Ce scénario est étudié afin d'évaluer le bilan économique en cas de ressource très favorable. Ce scénario est très optimiste. Il s'appuie sur une hypothèse de 100 m³/h disponibles par doublet (scénario établi avant réception du rapport hydrogéologique d'ANTEA ; suite à la réception de ce rapport, ce scénario paraît excessivement optimiste sur la ressource).

V.5.1. Descriptif technique

Centrale de production

La production de chaleur est assurée par deux doublets géothermiques et une chaufferie appoint secours gaz.

La puissance en énergies renouvelables nécessaire pour couvrir plus de 60% des besoins de la ZAC en énergies renouvelables est de 1 500 kW.

Pour un delta de 6,5°C prélevé sur la ressource, le débit total à valoriser sur la nappe est de 200 m³/h.

Dans ce scénario, on suppose que deux doublets suffisent pour fournir ces 200 m³/h (soit 100 m³/h par doublet).

Une pompe à chaleur centralisée est installée pour relever le niveau de température sur le réseau.

La puissance gaz appoint/secours installée est de 12 000 kW.

La surface nécessaire pour la chaufferie comprenant process gaz, hydraulique, pompe à chaleur et locaux électriques est de 260 m² environ.

Réseau

Un réseau de chauffage urbain basse température est créé pour alimenter l'ensemble des îlots de la ZAC.

La longueur de réseau à créer est de 2 200 ml environ (longueur de tranchée).

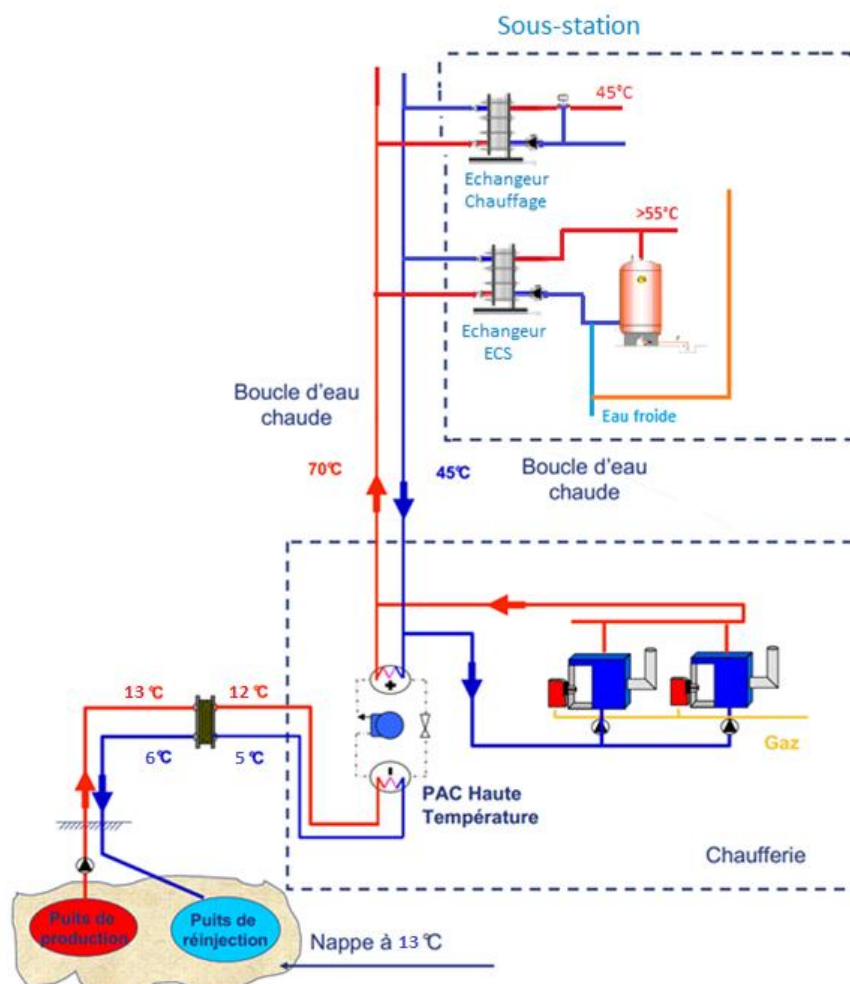
Le réseau prévu est un réseau basse température (départ primaire à 70°C environ).

Sous-stations

Les sous-stations sont créées en pied d'immeuble pour la distribution de chaleur.

Une solution avec 36 sous-stations de distribution a été étudiée. Un local sera à disposition pour installer les équipements (poste de livraison).

Le schéma de fonctionnement est le suivant :



Evaluation économique

Hypothèses

Création de deux doublets avec 100 m³/h disponibles par doublet (excessivement optimiste).

Les aides

Le calcul du niveau d'aide est basé sur la méthode de calcul du fonds chaleur.

Pour les installations géothermie, les niveaux d'aide maximum et minimum pour l'installation de production géothermie et le réseau de distribution sont découplées.

Pour les pompes à chaleur sur nappe, le niveau d'aide minimum est de 50 000 € et le maximum est 120 €/tep EnR sur 20 ans, soit environ 1 400 €/MWh sur 20 ans. Le plafond est ainsi de 2 000 000 €. Cependant ce montant d'aide est plafonné à 60% des investissements sur la partie géothermie, soit 680 000 € HT.

Le réseau bénéficie de subventions à hauteur de 390 €/ml, plafonné à 55% de l'investissement réseau soit 1 350 000 €.

Ainsi, le plafond pour le présent projet, avec 2 200 ml de réseau s'élève à

$$680\,000 + 1\,350\,000 = 2\,030\,000\,€$$

$$\text{Le minimum d'aide est de } 50\,000 + 220\,000 = 270\,000\,€$$

Evaluation des coûts sur une durée de 24 ans

Le prix de la chaleur du scénario 2 – Pompe à chaleur centralisée sur nappe avec gaz appoint/secours est évalué à environ 75,4 € TTC/MWh sur 24 ans, sans subvention.

Avec un niveau de subvention moyen, le prix de la chaleur est évalué à 67,4 € TTC/MWh.

Le montant des investissements liés à ce scénario se répartit ainsi :

Investissements		
Process	2 484	k€ HT
Réseau	2 469	k€ HT
Sous-stations	744	k€ HT
Total	5 696	k€ HT

Les investissements liés au process comprennent les investissements suivants :

- Création de deux doublets géothermiques
- Installation des équipements liés au forage dont la pompe à chaleur
- Installation de deux chaudières gaz appoint/secours de 6 MW de puissance unitaire
- Le bâtiment chaufferie gaz et la surface pour les équipements de surface de la géothermie (dont la pompe à chaleur)
- L'accès à la chaufferie depuis la voirie

Néanmoins, au vu du potentiel géothermique identifié sur la ZAC L'Arsenal, l'obtention de 100 m³/h par puits de production est un scénario excessivement optimiste.

Par conséquent, un scénario 2 bis, avec 50 m³/h par doublet est étudié par la suite (scénario encore trop optimiste au regard des résultats de l'étude hydrogéologique).

Un troisième scénario s'appuyant sur le potentiel pressenti (30 m³/h par forage sera également étudié). Ce scénario implique la création de 7 doublets sur la nappe.

Le tableau du bilan économique du scénario 2 est présenté ci-après :



Scénario 2																								
Hypothèse très optimiste : 2 doublets de géothermie soit 100 m3/h par forage																								
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Ventes (MWh)	4 581	8 456	14 052	14 584	15 116	15 648	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180
Puissance souscrite sur réseau (kW)	2 508	4 683	7 560	7 848	8 135	8 422	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710
Taux EnR&R	72%	62%	70%	68%	68%	67%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%
Production (MWh utile)	4 926	9 092	15 110	15 682	16 254	16 826	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397
Consommations Electricité (MWh utile) PAC	1 018	1 611	3 007	3 047	3 158	3 221	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143
Consommation Gaz (MWh utile)	1 365	3 455	4 585	5 018	5 201	5 552	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398
Consommations Electricité (MWh utile) PAC	1 018	1 611	3 007	3 047	3 158	3 221	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143
Consommation Gaz (MWh PCI)	1 516	3 839	5 094	5 576	5 779	6 169	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109
Consommation Gaz (MWh PCS)	1 685	4 265	5 660	6 195	6 421	6 855	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899
R1 (k€ HT) - Part variable	124	233	383	398	413	428	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
R2 (k€ HT) - Part fixe (abonnement)																								
R21 - Dépenses électricité (k €HT) Equipements hors PAC	5	10	17	17	18	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
R22 - Entretien courant (k€ HT)	73	73	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114
R23 - Gros entretien et renouvellement (k€ HT)	36	36	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
R24 : Annuités d'amortissement	-11	29	116	426	426	426	426	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461	461
Droits de raccordements (k€ HT)	301	261	345	34	34	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dépenses liées au R1 (k€ HT)	124	233	383	398	413	428	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
Dépenses liées au R2 (k€ HT)	103	148	303	615	615	616	617	651	651	651	651	651	651	651	651	651	651	651	651	651	651	651	651	651
Total des dépenses (k € HT)	228	381	686	1 013	1 028	1 044	1 062	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096	1 096
Total des recettes (k € HT)	246	412	741	1 094	1 110	1 127	1 147	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184	1 184
Résultat BRUT (k €HT)	18	30	55	81	82	84	85	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
Prix moyen chaleur sans subvention	75,43	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions mini	70,70	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions moyenne	67,39	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions maxi	65,45	€ TTC/MWh																						

V.6. Scénario 2 bis – PAC centralisée sur nappe (scénario optimiste)

Ce scénario est étudié afin d'évaluer le bilan économique, avec une hypothèse intermédiaire (entre les scénarios 2 et 2ter) sur la ressource : l'hypothèse de 50 m³/h disponibles par doublet reste très optimiste. Néanmoins, ce scénario nécessite la mise en œuvre de 4 doublets. Cette solution met en œuvre des installations de forages plus conséquentes, avec une distance entre deux forages de 150 mètres au minimum à prévoir.

V.6.1. Descriptif technique

Le principe de ce scénario est identique à celui du scénario 2. Seul le nombre de doublets est modifié par rapport au scénario 2.

Centrale de production

La production de chaleur est assurée par quatre doublets géothermiques et une chaufferie appoint secours gaz.

La puissance en énergies renouvelables nécessaire pour couvrir plus de 60% des besoins de la ZAC en énergies renouvelables est de 1 500 kW.

Pour un delta de 6,5°C prélevé sur la ressource, le débit total à valoriser sur la nappe est de 200 m³/h.

Dans ce scénario, on suppose que quatre doublets suffisent pour fournir ces 200 m³/h (soit 50 m³/h par doublet) : scénario optimiste

Une pompe à chaleur centralisée est installée pour relever le niveau de température sur le réseau.

La puissance gaz appoint/secours installée est de 12 000 kW.

La surface nécessaire pour la chaufferie comprenant process gaz, hydraulique, pompe à chaleur et locaux électriques est de 260 m² environ.

Réseau

Un réseau de chauffage urbain basse température est créé pour alimenter l'ensemble des îlots de la ZAC.

La longueur de réseau à créer est de 2 200 ml environ (longueur de tranchée).

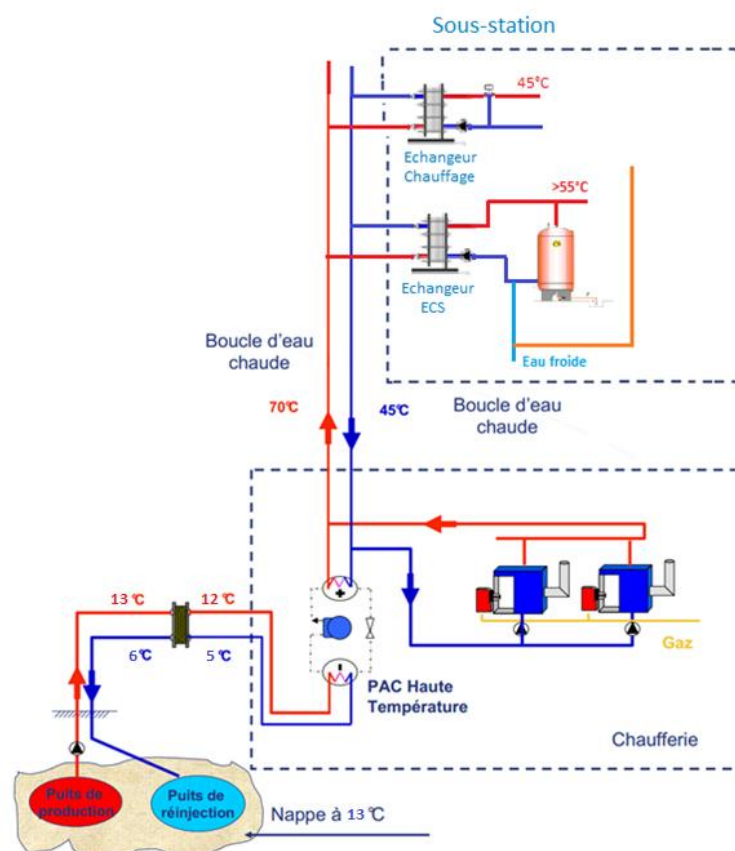
Le réseau prévu est un réseau basse température (départ primaire à 70°C environ).

Sous-stations

Les sous-stations sont créées en pied d'immeuble pour la distribution de chaleur.

Une solution avec 36 sous-stations de distribution a été étudiée. Un local sera à disposition pour installer les équipements (poste de livraison).

Le schéma de fonctionnement est le suivant :



V.6.2. Evaluation économique

Hypothèses

Création de quatre doublets avec 50 m³/h disponibles par doublet (optimiste).

Les aides

Le calcul du niveau d'aide est basé sur la méthode de calcul du fonds chaleur.

Pour les installations géothermie, les niveaux d'aide maximum et minimum pour l'installation de production géothermie et le réseau de distribution sont découplés.

Pour les pompes à chaleur sur nappe, le niveau d'aide minimum est de 50 000 € et le maximum est 120 €/tep EnR sur 20 ans, soit environ 1 400 €/MWh sur 20 ans. Le plafond est ainsi de 2 000 000 €. Cependant ce montant d'aide est plafonné à 60% des investissements sur la partie géothermie, soit 1 115 000 € HT.

Le réseau bénéficie de subventions à hauteur de 390 €/ml, plafonné à 55% de l'investissement réseau soit 1 350 000 €.

Ainsi, le plafond pour le présent projet, avec 2 200 ml de réseau s'élève à

$$1\,115\,000 + 1\,350\,000 = 2\,445\,000 \text{ €}$$

$$\text{Le minimum d'aide est de } 50\,000 + 220\,000 = 270\,000 \text{ €}$$

Evaluation des coûts sur une durée de 24 ans

Le prix de la chaleur du scénario 2 bis – Pompe à chaleur centralisée sur nappe avec gaz appoint/secours est évalué à environ 81,3 € TTC/MWh sur 24 ans, sans subvention.

Avec un niveau de subvention médian, le prix de la chaleur est évalué à 73,0 € TTC/MWh.

Le montant des investissements liés à ce scénario se répartit ainsi :

Investissements		
Process	3 216	k€ HT
Réseau	2 469	k€ HT
Sous-stations	744	k€ HT
Total	6 428	k€ HT

Les investissements liés au process comprennent les investissements suivants :

- Création de quatre doublets géothermiques
- Installation des équipements liés au forage dont la pompe à chaleur
- Installation de deux chaudières gaz appoint/secours de 6 MW de puissance unitaire
- Le bâtiment chaufferie gaz et la surface pour les équipements de surface de la géothermie (dont la pompe à chaleur)
- L'accès à la chaufferie depuis la voirie

Le tableau du bilan économique du scénario 2 bis est présenté ci-dessous :



Scénario 2 bis																								
Hypothèse optimiste : 4 puits de production de 50 m ³ /h par forage																								
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Ventes (MWh)	4 581	8 456	14 052	14 584	15 116	15 648	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180
Puissance souscrite sur réseau (kW)	2 508	4 683	7 560	7 848	8 135	8 422	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710
Taux EnR&R	72%	62%	70%	68%	68%	67%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%
Production (MWh utile)	4 926	9 092	15 110	15 682	16 254	16 826	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397
Consommations Electricité (MWh utile) PAC	1 018	1 611	3 007	3 047	3 158	3 221	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143
Consommation Gaz (MWh utile)	1 365	3 455	4 585	5 018	5 201	5 552	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398
Consommations Electricité (MWh utile) PAC	1 018	1 611	3 007	3 047	3 158	3 221	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143
Consommation Gaz (MWh PCI)	1 516	3 839	5 094	5 576	5 779	6 169	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109
Consommation Gaz (MWh PCS)	1 685	4 265	5 660	6 195	6 421	6 855	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899
R1 (k€ HT) - Part variable	124	233	383	398	413	428	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
R2 (k€ HT) - Part fixe (abonnement)																								
R21 - Dépenses électricité (k €HT) Equipements hors PAC	5	10	17	17	18	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
R22 - Entretien courant (k€ HT)	80	80	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129
R23 - Gros entretien et renouvellement (k€ HT)	40	40	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
R24 : Annuités d'amortissement	18	58	175	486	486	486	486	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520
Droits de raccordements (k€ HT)	301	261	345	34	34	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dépenses liées au R1 (k€ HT)	124	233	383	398	413	428	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
Dépenses liées au R2 (k€ HT)	144	188	385	696	697	697	698	733	733	733	733	733	733	733	733	733	733	733	733	733	733	733	733	733
Total des dépenses (k € HT)	268	421	768	1 094	1 110	1 125	1 143	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178	1 178
Total des recettes (k € HT)	289	455	829	1 182	1 198	1 215	1 235	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272	1 272
Résultat BRUT (k €HT)	21	34	61	88	89	90	91	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
Prix moyen chaleur sans subvention	81,30	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions mini	76,26	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions moyenne	72,17	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions maxi	69,71	€ TTC/MWh																						

V.7. Scénario 2 ter : PAC centralisée sur nappe – (scénario réaliste en termes de ressources géothermiques)

Ce scénario évalue le bilan économique d'une solution en cas de potentiel géothermique conforme aux débits attendus : 30 m³/h par doublet.

Au moins 14 forages sont à créer dans ce cas, avec une interdistance minimum de 150 mètres entre forages.

V.7.1. Descriptif technique

Le principe de ce scénario est identique à celui du scénario 2. Seul le nombre de doublets est modifié par rapport au scénario 2.

Centrale de production

La production de chaleur est assurée par sept doublets géothermiques et une chaufferie appoint secours gaz.

La puissance en énergies renouvelables nécessaire pour couvrir plus de 60% des besoins de la ZAC en énergies renouvelables est de 1 500 kW.

Pour un delta de 6,5°C prélevé sur la ressource, le débit total à valoriser sur la nappe est de 200 m³/h.

Selon l'étude de potentiel géothermique, un débit de 30 m³/h peut être espéré par doublet. Dans ce cas, 7 doublets sont à prévoir.

Une pompe à chaleur centralisée est installée pour relever le niveau de température sur le réseau.

La puissance gaz appoint/secours installée est de 12 000 kW.

V.8. Scénario 2 ter : PAC centralisée sur nappe – (scénario réaliste en termes de ressources géothermiques)

Ce scénario évalue le bilan économique d'une solution en cas de potentiel géothermique conforme aux débits attendus : 30 m³/h par doublet.

Au moins 14 forages sont à créer dans ce cas, avec une interdistance minimum de 150 mètres entre forages.

V.8.1. Descriptif technique

Le principe de ce scénario est identique à celui du scénario 2. Seul le nombre de doublets est modifié par rapport au scénario 2.

Centrale de production

La production de chaleur est assurée par sept doublets géothermiques et une chaufferie appoint secours gaz.

La puissance en énergies renouvelables nécessaire pour couvrir plus de 60% des besoins de la ZAC en énergies renouvelables est de 1 500 kW.

Pour un delta de 6,5°C prélevé sur la ressource, le débit total à valoriser sur la nappe est de 200 m³/h.

Selon l'étude de potentiel géothermique, un débit de 30 m³/h peut être espéré par doublet. Dans ce cas, 7 doublets sont à prévoir.

Une pompe à chaleur centralisée est installée pour relever le niveau de température sur le réseau.

La puissance gaz appoint/secours installée est de 12 000 kW.

La surface nécessaire pour la chaufferie comprenant process gaz, hydraulique, pompe à chaleur et locaux électriques est de 260 m² environ.

Réseau

Un réseau de chauffage urbain basse température est créé pour alimenter l'ensemble des îlots de la ZAC.

La longueur de réseau à créer est de 2 200 ml environ (longueur de tranchée).

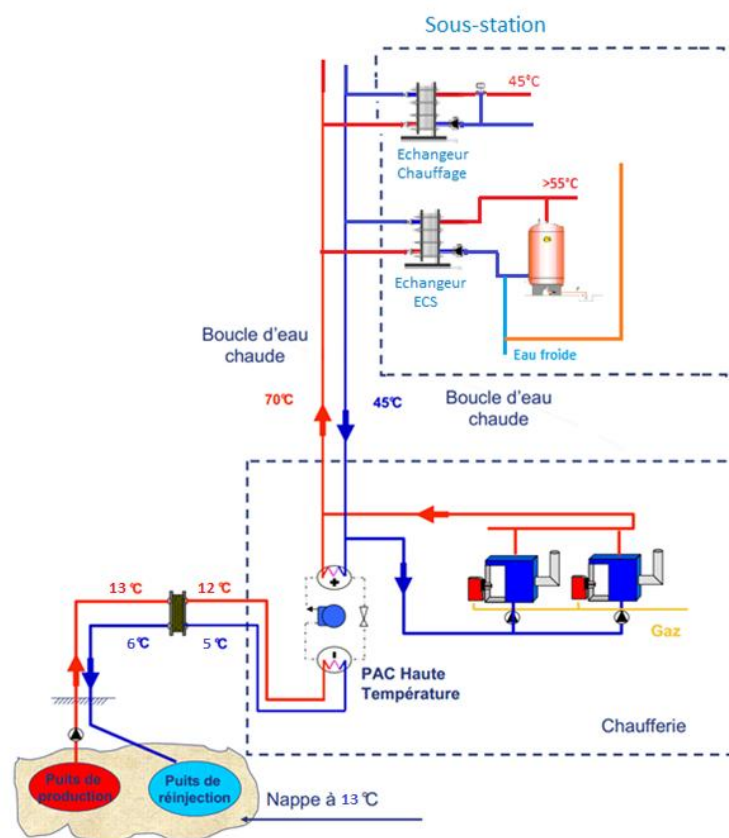
Le réseau prévu est un réseau basse température (départ primaire à 70°C environ).

Sous-stations

Les sous-stations sont créées en pied d'immeuble pour la distribution de chaleur.

Une solution avec 36 sous-stations de distribution a été étudiée. Un local sera à disposition pour installer les équipements (poste de livraison).

Le schéma de fonctionnement est le suivant :



V.8.2. Evaluation économique

Hypothèses

Création de 7 doublets géothermiques avec un débit de 30 m³/h par doublet.

Les aides

Le calcul du niveau d'aide est basé sur la méthode de calcul du fonds chaleur.

Pour les installations géothermie, les niveaux d'aide maximum et minimum pour l'installation de production géothermie et le réseau de distribution sont découplés.

Pour les pompes à chaleur sur nappe, le niveau d'aide minimum est de 50 000 € et le maximum est 120 €/tep EnR sur 20 ans, soit environ 1 400 €/MWh sur 20 ans. Le plafond est ainsi de 2 000 000 €. Cependant ce montant d'aide est plafonné à 60% des investissements sur la partie géothermie, soit 1 800 000 € HT.

Le réseau bénéficie de subventions à hauteur de 390 €/ml, plafonné à 55% de l'investissement réseau soit 1 350 000 €.

Ainsi, le plafond pour le présent projet, avec 2 200 ml de réseau s'élève à

$$1\,800\,000 + 1\,350\,000 = 3\,150\,000 \text{ €}$$

$$\text{Le minimum d'aide est de } 50\,000 + 220\,000 = 270\,000 \text{ €}$$

Evaluation des coûts sur une durée de 24 ans

Le prix de la chaleur du scénario 2 ter – Pompe à chaleur centralisée sur nappe avec gaz appoint/secours est évalué à environ 90,6 € TTC/MWh sur 24 ans, sans subvention.

Avec un niveau de subvention médian, le prix de la chaleur est évalué à 80,7 € TTC/MWh.

Le montant des investissements liés à ce scénario se répartit ainsi :

Investissements		
Process	4 360	k€ HT
Réseau	2 469	k€ HT
Sous-stations	744	k€ HT
Total	7 573	k€ HT

Les investissements liés au process comprennent les investissements suivants :

- Création de sept doublets géothermiques
- Installation des équipements liés au forage dont la pompe à chaleur
- Installation de deux chaudières gaz appoint/secours de 6 MW de puissance unitaire
- Le bâtiment chaufferie gaz et la surface pour les équipements de surface de la géothermie (dont la pompe à chaleur)
- L'accès à la chaufferie depuis la voirie

Le tableau du bilan économique du scénario 2 ter est présenté ci-après :



Scénario 2 ter																								
Hypothèse réaliste : 7 puits de production de 30 m ³ /h par forage																								
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Ventes (MWh)	4 581	8 456	14 052	14 584	15 116	15 648	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180
Puissance souscrite sur réseau (kW)	2 508	4 683	7 560	7 848	8 135	8 422	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710
Taux EnR&R	72%	62%	70%	68%	68%	67%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%
Production (MWh utile)	4 926	9 092	15 110	15 682	16 254	16 826	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397
Consommations Electricité (MWh utile) PAC	1 018	1 611	3 007	3 047	3 158	3 221	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143
Consommation Gaz (MWh utile)	1 365	3 455	4 585	5 018	5 201	5 552	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398
Consommations Electricité (MWh utile) PAC	1 018	1 611	3 007	3 047	3 158	3 221	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143
Consommation Gaz (MWh PCI)	1 516	3 839	5 094	5 576	5 779	6 169	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109
Consommation Gaz (MWh PCS)	1 685	4 265	5 660	6 195	6 421	6 855	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899
				788																				
R1 (k€ HT) - Part variable	124	233	383	398	413	428	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
R2 (k€ HT) - Part fixe (abonnement)																								
R21 - Dépenses électricité (k €HT) Equipements hors PAC	5	10	17	17	18	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
R22 - Entretien courant (k€ HT)	95	95	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151	151
R23 - Gros entretien et renouvellement (k€ HT)	48	48	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76
R24 : Annuités d'amortissement	78	118	268	578	578	578	578	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613
Droits de raccordements (k€ HT)	301	261	345	34	34	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dépenses liées au R1 (k€ HT)	124	233	383	398	413	428	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
Dépenses liées au R2 (k€ HT)	226	271	511	823	824	824	825	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860
Total des dépenses (k € HT)	351	504	894	1 221	1 237	1 252	1 270	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304	1 304
Total des recettes (k € HT)	379	544	966	1 319	1 335	1 352	1 372	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409	1 409
Résultat BRUT (k €HT)	28	40	72	98	99	100	102	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104
Prix moyen chaleur sans subvention	90,56	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions mini	85,04	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions moyenne	80,74	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions maxi	76,45	€ TTC/MWh																						

V.9. Scénario 3 : PAC décentralisées sur réseau d'eau tempérée

Ce scénario est étudié afin d'évaluer le bilan économique d'une solution de réseau d'eau tempérée avec pompes à chaleur installées dans chaque sous-station. L'hypothèse utilisée sur la ressource est de 50 m³/h disponibles par doublet (comme dans le scénario 2bis avec PAC centralisée). Ce scénario permet d'envisager du rafraîchissement pour les bureaux.

V.9.1. Descriptif technique

Ce scénario prévoit l'exploitation de l'aquifère géothermique, avec un réseau d'eau tempéré circulant dans la ZAC.

Des pompes à chaleur sont installées dans chaque sous-station pour produire ECS et chauffage. Une chaufferie gaz appoint/secours fournit le complément nécessaire.

Des piquages sont créés en supplément pour assurer le rafraîchissement gratuit des bureaux.

La surface nécessaire pour la chaufferie comprenant process gaz, hydraulique, pompe à chaleur et locaux électriques est de 240 m² environ.

Centrale de production

Les aides

Le calcul du niveau d'aide est basé sur la méthode de calcul du fonds chaleur.

Pour les installations géothermie, les niveaux d'aide maximum et minimum pour l'installation de production géothermie et le réseau de distribution sont découplés.

Pour les pompes à chaleur sur nappe, le niveau d'aide minimum est de 50 000 € et le maximum est 120 €/tep EnR sur 20 ans, soit environ 1 400 €/MWh sur 20 ans. Le plafond est ainsi de 2 000 000 €. Cependant ce montant d'aide est plafonné à 60% des investissements sur la partie géothermie, soit 1 020 000 € HT.

Le réseau bénéficie de subventions à hauteur de 390 €/ml, plafonné à 55% de l'investissement réseau soit 1 350 000 €.

Ainsi, le plafond pour le présent projet, avec 2 200 ml de réseau s'élève à

$$1\,020\,000 + 1\,350\,000 = 2\,370\,000 \text{ €}$$

$$\text{Le minimum d'aide est de } 50\,000 + 220\,000 = 270\,000 \text{ €}$$

Evaluation des coûts sur une durée de 24 ans

Le prix de la chaleur du scénario 3 – Pompes à chaleur décentralisées sur nappe avec gaz appoint/secours est évalué à environ 82,1 € TTC/MWh sur 24 ans, sans subvention.

Avec un niveau de subvention médian, le prix de la chaleur est évalué à 73,1 € TTC/MWh.

Le montant des investissements liés à ce scénario se répartit ainsi :

Investissements		
Process	2 781	k€ HT
Réseau	2 098	k€ HT
Sous-stations	1 906	k€ HT
Total	6 785	k€ HT

Les investissements liés au process comprennent les investissements suivants :

- Création de quatre doublets géothermiques
- Installation des équipements liés au forage
- Installation de deux chaudières gaz appoint/secours de 6 MW de puissance unitaire
- Le bâtiment chaufferie gaz et la surface pour les équipements de surface de la géothermie (dont la pompe à chaleur)
- L'accès à la chaufferie depuis la voirie

Pour le scénario 3, il est possible d'effectuer un rafraîchissement des locaux bureaux. Il a été prévu dans les investissements d'ajouter des piquages supplémentaires afin de bénéficier de la température basse du réseau d'eau tempérée.

La puissance disponible sur le réseau pour le rafraîchissement des locaux est de 2 300 kW environ (pour un delta T de 10°C). Avec un ESEER de 5 sur les pompes à chaleur réversibles, la puissance disponible est de 1 900 kW en sortie de PAC pour le rafraîchissement.

Les besoins annuels en froid des bureaux sont de 30 kWhEP/m²/an, soit environ 1 100 MWhEP de besoins annuels en froid pour les bureaux. La puissance froid nécessaire pour le rafraîchissement de l'intégralité des bureaux (35 250 m²) est de 1 100 kW (avec une hypothèse de fonctionnement équivalent pleine puissance de 1 000 heures par an).

Le froid pourra être produit sur la période du 1^{er} juin au 30 septembre.

La production de froid peut être assurée en été pour les besoins de rafraîchissement des bureaux par des pompes à chaleur réversibles pour les sous-stations desservant

exclusivement des bureaux. Des thermofrigopompes produisant simultanément chaleur et froid devront être installées sur les sous-stations avec des usages mixtes. .

Dans ce cas (débit de 200 m³/h disponible issu des doublets géothermiques), l'intégralité des besoins de froid pourra être couverte par la ressource géothermique. Le tableau du bilan économique du scénario 3 est présenté ci-après :



Scénario 3																								
Hypothèse optimiste : 4 puits de production de 50 m ³ /h par forage																								
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
Ventes (MWh)	4 581	8 456	14 052	14 584	15 116	15 648	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180	16 180
Puissance souscrite sur réseau (kW)	2 508	4 683	7 560	7 848	8 135	8 422	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710	8 710
Taux EnR&R	72%	62%	70%	68%	68%	67%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%	63%
Production (MWh utile)	4 926	9 092	15 110	15 682	16 254	16 826	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397	17 397
Consommations Electricité (MWh utile) PAC	1 018	1 611	3 007	3 047	3 158	3 221	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143
Consommation Gaz (MWh utile)	1 365	3 455	4 585	5 018	5 201	5 552	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398	6 398
Consommations Electricité (MWh utile) PAC	1 018	1 611	3 007	3 047	3 158	3 221	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143	3 143
Consommation Gaz (MWh PCI)	1 516	3 839	5 094	5 576	5 779	6 169	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109	7 109
Consommation Gaz (MWh PCS)	1 685	4 265	5 660	6 195	6 421	6 855	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899	7 899
R1 (k€ HT) - Part variable	124	233	383	398	413	428	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
R2 (k€ HT) - Part fixe (abonnement)																								
R21 - Dépenses électricité (k €HT) Equipements hors PAC	5	10	17	17	18	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
R22 - Entretien courant (k€ HT)	69	69	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118
R23 - Gros entretien et renouvellement (k€ HT)	34	34	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
R24 : Annuités d'amortissement	8	48	205	516	516	516	516	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550
Droits de raccordements (k€ HT)	301	261	345	34	34	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dépenses liées au R1 (k€ HT)	124	233	383	398	413	428	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445	445
Dépenses liées au R2 (k€ HT)	117	161	398	710	710	711	712	746	746	746	746	746	746	746	746	746	746	746	746	746	746	746	746	746
Total des dépenses (k € HT)	241	394	781	1 108	1 123	1 139	1 157	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191
Total des recettes (k € HT)	260	426	844	1 197	1 213	1 230	1 249	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286	1 286
Résultat BRUT (k €HT)	19	32	62	89	90	91	93	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Prix moyen chaleur sans subvention	82,06	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions mini	76,98	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions moyenne	73,07	€ TTC/MWh																						
Prix moyen chaleur avec subventions maxi	70,73	€ TTC/MWh																						

V.10. Scénario 4 – Réseau d’eau tempérée pour les bureaux et réseau basse température pour la ZAC hors bureaux

V.10.1. Descriptif technique

Compte tenu des contraintes sur la ressource géothermique (cf. rapport d’ANTEA), nous proposons une solution mixte, à savoir la création de **deux réseaux distincts** :

- Un réseau basse température sur chaufferie bois pour toute la ZAC hors bureaux (îlots B1, B2 et C) avec appoint/secours gaz
- Un réseau d’eau tempérée pour les bureaux

Centrale de production

La production de chaleur est assurée par une chaufferie bois et une chaufferie appoint secours gaz.

Pour l’ensemble de la ZAC sur réseau basse température, la puissance bois installée est de 1 250 kW.

La puissance gaz appoint/secours installée est de 12 000 kW.

Un doublet géothermique est créé pour la zone bureau, avec une hypothèse de débit réaliste de 30 m³/h soit 220 kW EnR disponibles.

La surface nécessaire pour la chaufferie le process bois et le process gaz est de 300 m² environ. La surface de silo de stockage à prévoir est de 75 m² environ.

Réseau

Un réseau de chauffage urbain basse température est créé pour alimenter l’ensemble des îlots de la ZAC hors bureaux.

La longueur de réseau à créer est de 2 000 ml environ (longueur de tranchée).

Le réseau prévu est un réseau basse température (départ à 70°C environ).

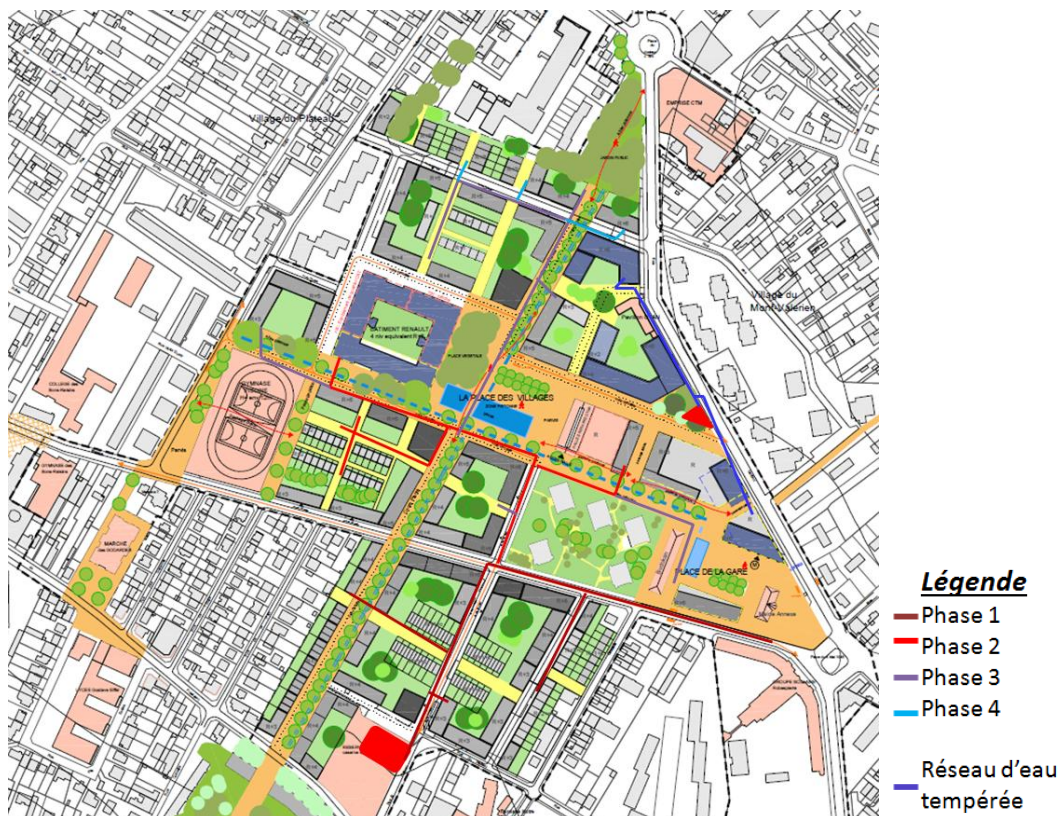
Pour la zone bureaux, un réseau d'eau tempérée de 350 ml environ est à créer.

Sous-stations

Les sous-stations sont créées en pied d'immeuble pour la distribution de chaleur.

Une solution avec 36 sous-stations de distribution a été étudiée.

Elles se répartissent ainsi : 32 sous-stations sur réseau basse température et 4 sous-stations sur réseau d'eau tempérée



V.10.2. Evaluation économique

Hypothèses

Le rendement chaudière bois est évalué à 87%

Le prix de la plaquette bois est évalué à 23,00 € HT/MWh PCI

Les aides

Le calcul du niveau d'aide est basé sur la méthode de calcul du fonds chaleur.

En cas de réalisation de chaufferie biomasse avec création de réseau de chaleur, l'aide est calculée globalement « chaufferie + réseau ».

Pour les chaufferies biomasse, le montant minimum d'aide est de 750 000 € et le plafond est de 1 200 000 € HT.

Le réseau bénéficie de subventions à hauteur de 200 €/ml, plafonné à 500 000 €.

Pour la pompe à chaleur, le niveau d'aide minimum est de 50 000 € et le plafond est de 60% du montant d'investissement lié aux installations géothermiques, soit 290 000 € HT.

Ainsi, le plafond pour le présent projet, s'élève à 1 990 000 € HT

Le minimum d'aide est de 960 000 € HT

Evaluation des coûts sur une durée de 24 ans

Le prix de la chaleur du scénario 4 – Chaufferie bois avec gaz appoint/secours et réseau d'eau tempérée pour la zone bureaux est évalué à environ 81,7 € TTC/MWh sur 24 ans, sans subvention.

Avec un niveau de subvention médian, le prix de la chaleur est évalué à 73,1 € TTC/MWh.

Le montant des investissements liés à ce scénario se répartit ainsi :

Investissements		
Basse température		
Process	2 182	k€ HT
Réseau	2 259	k€ HT
Sous-stations	654	k€ HT
Boucle tempérée		
Process	477	k€ HT
Réseau	290	k€ HT
Sous-stations	193	k€ HT
Total	6 056	k€ HT

Les investissements liés au process basse température comprennent les investissements suivants :

- Installation d'une chaudière bois 750 kW et une chaudière bois 500 kW
- Un silo de stockage pour un stockage de 4 jours de combustible
- Le bâtiment chaufferie pour le process bois
- Installation de deux chaudières gaz appoint/secours de 6 MW de puissance unitaire
- Le bâtiment chaufferie gaz
- L'accès à la chaufferie depuis la voirie

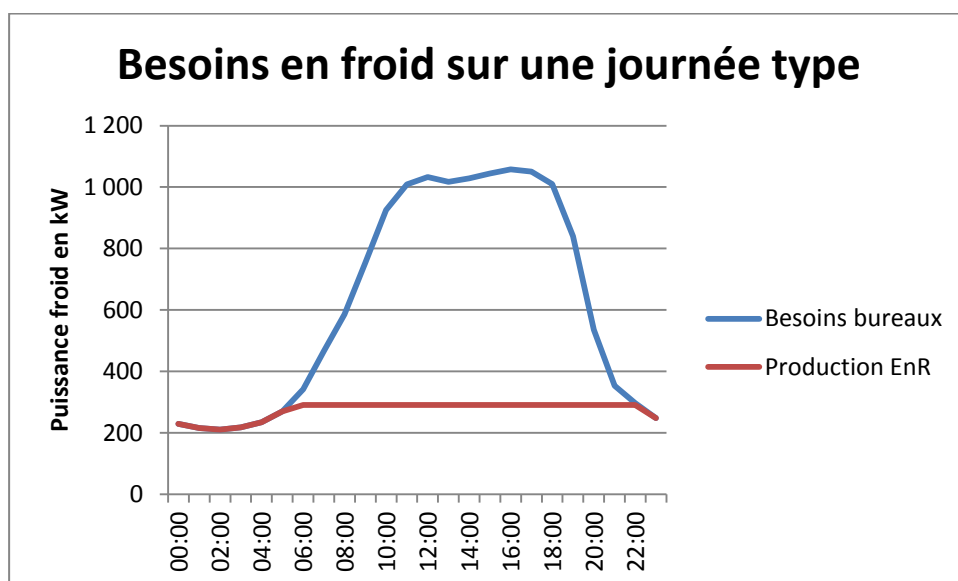
Pour le scénario 3, il est possible d'effectuer un rafraîchissement des locaux bureaux. Il a été prévu dans les investissements d'ajouter des piquages supplémentaires afin de bénéficier de la température basse du réseau d'eau tempérée.

La puissance disponible sur le réseau pour le rafraîchissement des locaux est de 350 kW environ (pour un delta T de 10°C). Avec un ESEER de 5 sur les pompes à chaleur réversibles, la puissance disponible est de 290 kW en sortie de PAC pour le rafraîchissement.

Les besoins en froid des bureaux sont de 1 100 MWh/an environ pour une puissance appelée de 1 100 kW.

L'intégralité des besoins ne peut être couverte par la ressource géothermique.

La courbe ci-dessous indique les besoins sur une journée-type sur la période d'été :



La ressource géothermique permet de couvrir environ 36% des besoins en froid des bureaux. Des groupes froids devront impérativement être prévus en appoint secours. Les sous-stations devront être bridées pour la production de froid afin d'obtenir de bien desservir de manière équilibrée toutes les sous-stations pour la production de froid.

Le tableau bilan économique du scénario 4 est présenté ci-après (hors groupes froids en appoint/secours) :

Juin 2015
Synthèse Etude Energétique – Indice B
94 / 99

V.11. Scénario référence : chaudières gaz collectives

Ce scénario évalue le bilan économique de la solution de référence : chaudières gaz collectives par immeuble. En effet, l'ADEME conditionne les aides à la réalisation d'un projet permettant d'aboutir à un prix de la chaleur moindre qu'une solution de référence.

V.11.1. Descriptif technique

Ce scénario sert de référence pour la comparaison des prix de la chaleur.

Centrale de production

La production est assurée par de petites chaufferies en pied de chaque immeuble.

L'exemple d'un bâtiment de 25 logements est pris dans ce scénario.

Réseau

Ce scénario ne nécessite aucun réseau.

Sous-stations

Ce scénario ne nécessite aucune sous-station. Des chaufferies sont créées pour chaque immeuble.

V.11.2. Evaluation économique

Hypothèses

Les hypothèses suivantes sont utilisées pour le calcul économique de ce scénario :

- 1 chaudière gaz par immeuble pour fourniture des besoins ECS et chauffage
- Immeuble type : 25 logements de 70 m²
- Consommations de chauffage : 30 kWh_{EP}/m²/an
- Consommations ECS : 25 kWh/m²/an
- Puissance chaudière : 70 kW
- Emprunt sur 12 ans, avec un taux de 4%
- Tarif gaz : tarif B2I-10% (besoins inférieurs à 150 MWh)

Les aides

Ce scénario ne bénéficie pas d'aides.

Evaluation des coûts sur une durée de 12 ans

Le tableau suivant présente la synthèse des investissements et coûts d'exploitation.

Le prix de la chaleur résultant est présenté hors subventions et avec subventions.

Le prix de la chaleur du scénario de référence est évalué à environ 87,2 € TTC/MWh.

Le tableau du bilan économique du scénario de référence est présenté ci-dessous :

Rueil ZAC Mont Valérien	
Nombre de logement	25
Puissance souscrite (réseau de chaleur)	
Investissement en HT	14 000 € HT
Investissement en TTC	14 770 € TTC
Conso Gaz	119 MWh PCS
Conso totale Gaz	119 MWh PCS
	107 MWh PCI
Contrat de fourniture (Valeur 1er avril 2015 - 10%)	
Prix Gaz	38,97 € HT/MWhPCS
Abonnement	165,46 € HT /an
Location de poste	67,73 € HT /an
Dépenses prévisionnelles	
Part fixe (=R2 pour le réseau de chaleur)	233,19 € HT
Part variable (=R1 pour le réseau de chaleur)	4 630,69 € HT
P1 (Combustible chauffage)	4 863,88 € HT
P2 chaufferie (entretien maintenance)	969,00 € HT
P3 chaufferie (garantie totale)	663,00 € HT
Investissement sur 12 ans (4%)	1 491,73 € HT
TOTAL P1 + P2 + P3 + P4 (R1+R2)	7 987,61 € HT
Coût/MWh final	74,69 € HT
dont P1	45,48 € HT
dont P2	9,06 € HT
dont P3	6,20 € HT
dont P4	13,95 € HT
	246,02 € TTC
	5 556,83 € TTC
	5 802,85 € TTC
	1 162,80 € TTC
	795,60 € TTC
	1 567,06 € TTC
	9 328,31 € TTC
	87,23 € TTC
	54,26 € TTC
	10,87 € TTC
	7,44 € TTC
	14,65 € TTC

VI. SYNTHÈSE

Le prix de la chaleur est le plus faible pour le scénario 2. Néanmoins, ce scénario s'appuie sur une hypothèse excessivement optimiste du potentiel de production par doublet géothermique (cf. rapport d'ANTEA).

En comparant les scénarios avec des hypothèses réalistes (scénarios 1, 2 ter et 4), le scénario présentant le prix de la chaleur le plus compétitif est le scénario 1.

Néanmoins, les scénarios 3 et 4 présentent l'avantage d'offrir une solution de rafraîchissement des bureaux. Pour le scénario 4, l'installation de groupes froids sera néanmoins indispensable pour l'appoint/secours.

N.B. : Le taux de TVA appliqué sur le terme R2 (terme fixe) de facturation de la chaleur sur un réseau de chauffage urbain est de 5,5%

Le taux de TVA appliqué sur le terme R1 (terme proportionnel aux consommations) est de 5,5% pour les réseaux alimentés à plus de 50% par des EnR&R (20% si <50% EnR&R)

Le taux de TVA appliqué sur l'abonnement gaz est de 5,5%. Le taux de TVA appliqué sur les consommations de gaz est de 20 %.

Le tableau suivant présente le bilan économique de l'ensemble des scénarios retenus

	Scénario 1 - 2 chaudières bois plaquettes 800 et 700kW puissance unitaire	Scénario 2 bis - PAC sur nappe 4 doublets de 50 m3/h	Scénario 3 Pac décentralisées réseau d'eau tempérée 4 doublets de 50 m3/h	Scénario 4 Réseau bois principal et réseau secondaire eau tempérée pour bureaux	Scénario référence (calcul hors surcoût bâti)
Taux d'EnR	61%	61%	61%	63%	0%
Investissements (k€ HT)					
<i>Process</i>	2 254	3 216	2 781	2 659	
<i>Réseau</i>	2 469	2 469	2 098	2 549	
<i>Sous-stations</i>	744	744	1 906	848	
Total brut (k€ HT)	5 467	6 428	6 785	6 056	
Total Net (k€ HT) (y compris subventions - méthode de calcul fonds chaleur - et droits de raccordements)	3 086	3 736	4 152	3 533	
Subventions					
<i>Minimum</i>	18%	4%	4%	16%	
<i>Moyen</i>	24%	26%	23%	24%	
<i>Maximum</i>	31%	39%	35%	33%	
R1 (k€ HT/an) - Part variable (ventes de chaleur)	439	416	416	436	
R2 (k€ HT)/an - Part fixe (abonnement)	533	596	609	589	
<i>R21 - Dépenses électricité (k€ HT/an)</i>	44	18	18	39	
<i>R22 - Entretien courant (k€ HT/an)</i>	106	125	113	118	
<i>R23 - Gros entretien et renouvellement (k€ HT/an)</i>	53	62	57	59	
<i>R24 : Annuités d'amortissement (k€ HT/an)</i>	329	391	421	372	
Prix de la chaleur (en €TTC/MWh) avec aide niveau moyen	69,22	72,17	73,07	73,06	87,23
R1 (€HT/MWh)	31,26	27,46	27,46	28,80	50,53
R2 (€ HT/kW)	65,24	73,06	74,61	71,86	48,24
Prix de la chaleur (en €TTC/MWh) sans aide	77,21	81,30	82,06	81,71	87,23
Coût global chauffage et ECS pour un logement type en € HT/an avec aide niveau moyen	327,09	331,44	335,78	334,24	368,55
Coût global chauffage et ECS pour un logement type en € TTC/an avec aide niveau moyen	343,45	348,02	352,56	350,96	422,67
<i>Droits de raccordement (€ HT/kW souscrit)</i>	120	120	120	120	
<i>Droits de raccordement moyen (€ HT/logement type)</i>	360	360	360	360	