



Chauffage urbain

CHOISY - VITRY

S.I.C.U.C.V
HOTEL DE VILLE
2, avenue Youri Gagarine
94407 VITRY SUR SEINE Cedex

Mise à jour du schéma directeur du réseau de chaleur de Choisy-Vitry



Phase 2 : État des lieux des sources de chaleur à proximité



SOMMAIRE

0. OBJET.....	3
1. RÉSEAUX DE CHALEUR A PROXIMITÉ.....	4
1.1. INTERCONNEXION AU RESEAU SEMMARIS.....	4
1.2. INTERCONNEXION AU RESEAU D'IVRY-SUR-SEINE.....	5
1.3. AUTRES INTERCONNEXIONS.....	6
2. RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE.....	7
2.1. USINES D'INCINÉRATION DE DÉCHETS.....	7
2.2. AUTRES SOURCES DE CHALEUR FATALE HAUTE TEMPÉRATURE.....	8
2.3. DATA-CENTERS.....	9
2.4. STATIONS D'ÉPURATION / EAUX USÉES.....	13
3. GÉOTHERMIE PROFONDE.....	14
3.1. GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE.....	15
3.2. GÉOTHERMIE SUR NAPPE.....	26
4. BIOMASSE.....	28
4.1. GÉNÉRALITÉS.....	28
4.2. TARIFS.....	30
4.3. CONTRAINTES D'IMPLANTATION.....	31
4.4. RÉGLEMENTATION.....	31
4.5. APPLICATION.....	32
5. STOCKAGE THERMIQUE.....	34
5.1. GÉNÉRALITÉS.....	34
5.2. TECHNOLOGIES EXISTANTES.....	35
5.3. APPLICATIONS AU CAS DU RÉSEAU DU SICUCV.....	36
6. FOCUS ZAC SEINE GARE.....	38
7. CONCLUSIONS.....	40

0. OBJET

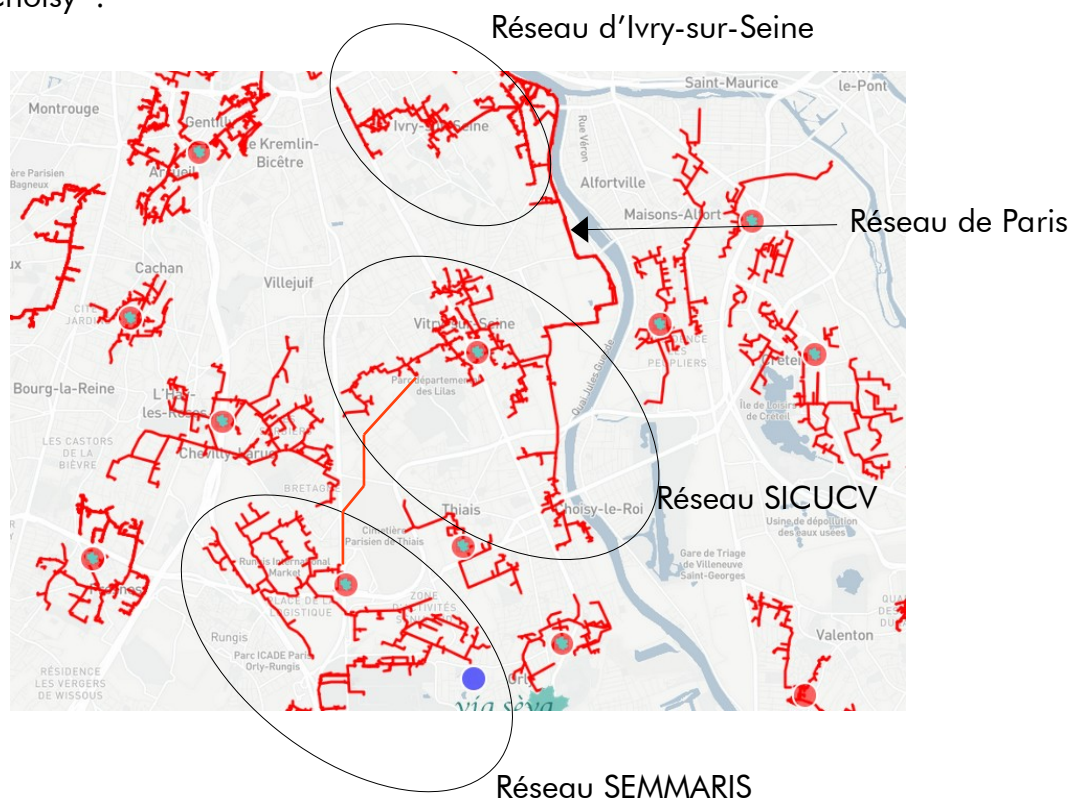
Le diagnostic du réseau a mis en évidence l'importance de diversifier les sources d'énergie sur le réseau de Choisy-Vitry, à la fois pour la maîtrise des coûts et le respect des objectifs environnementaux nationaux.

L'objet de ce rapport est donc de présenter un aperçu global des sources d'énergie alternatives disponibles localement, en évaluant la pertinence de celles-ci au regard des coûts, des bénéfices et du contexte, et en suivant l'ordre de priorité préconisé dans la démarche ENR'CHOIX de l'ADEME : interconnexion de réseaux, récupération d'énergie fatale, géothermie, biomasse, et autres.

Les sources d'ENR&R les plus pertinentes seront intégrées dans la suite de l'étude, lors de l'élaboration des scénarios d'évolution du réseau.

1. RÉSEAUX DE CHALEUR A PROXIMITÉ

La carte suivante (source : Via Seva) présente les réseaux de chaleur situés à proximité de Vitry et Choisy :

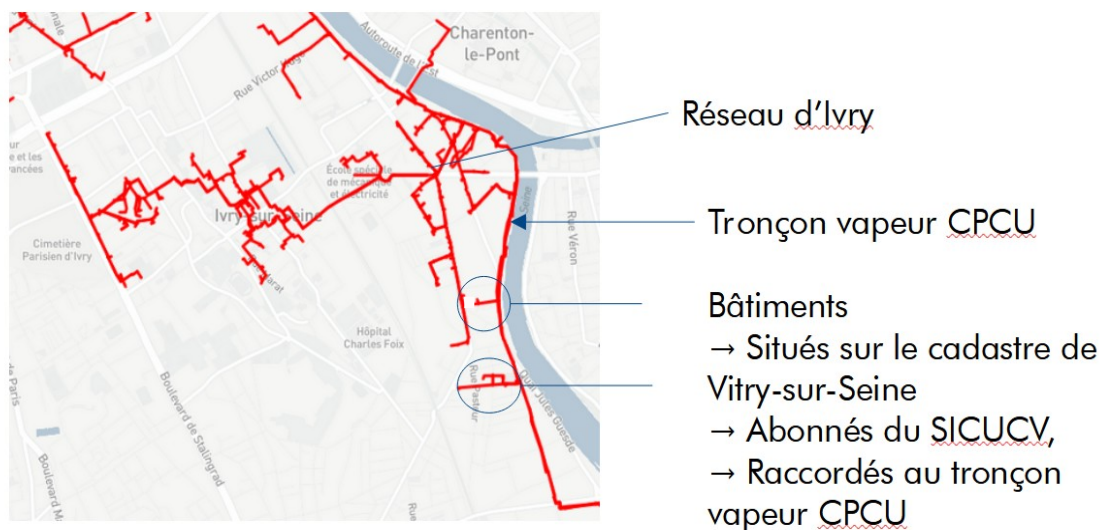


1.1. INTERCONNEXION AU RESEAU SEMMARIS

Le réseau SICUCV est relié depuis 2014 au réseau SEMMARIS, ce qui lui permet de bénéficier de la chaleur de récupération de l'incinérateur de Rungis (cf. 2.1 USINES D'INCINÉRATION DE DÉCHETS).

1.2. INTERCONNEXION AU RESEAU D'IVRY-SUR-SEINE

Le réseau d'Ivry-sur-Seine, situé au Nord de Vitry, est très proche de deux ensembles de bâtiments, abonnés de CVD, qui sont situés sur la Ville de Vitry, et sont actuellement alimentés par le réseau CPCU directement, comme indiqué dans la carte ci-dessous :



Le SICUCV souhaiterait relier ces bâtiments au réseau d'Ivry, afin qu'ils puissent bénéficier d'une chaleur provenant à 60-70% par de la géothermie, et à 30-40 % par CPCU.

Néanmoins, les régimes de température posent problème puisque le fonctionnement optimal de la géothermie à Ivry nécessite un retour d'eau à environ 45°C, et températures de retour des bâtiments concernés se situent plutôt autour de 55°C.

Des travaux de rénovation pourraient néanmoins permettre d'abaisser cette température : redimensionnement des échangeurs, utilisation de vannes de régulation à 2 voies, pompes à chaleur...

Par ailleurs, les réserves de puissance sur les tronçons concernés à Ivry sont limités. La Ville doit vérifier sa capacité de fournir environ 1 MW sur l'îlot le plus au Nord, et éventuellement 2,7 MW pour l'îlot le plus au Sud.

1.3. AUTRES INTERCONNEXIONS

D'après Via Seva, les autres réseaux à proximité bénéficient des mix énergétiques suivants :

- Thiais : géothermie (80%) + gaz (20%)
- Chevilly-Larue : géothermie (68%) + cogénération (25%) + gaz (7%)
- Orly : géothermie (81%) + gaz (19%) :

La position relativement éloignée de ces réseaux par rapport aux abonnés du SICUCV ne permet pas d'identifier un potentiel d'interconnexion viable pour importer de la chaleur géothermique.

2. RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE

La chaleur fatale désigne la chaleur résiduelle issue d'un procédé dont l'objectif principal n'est pas la production de cette chaleur. Elle est considérée comme une énergie n'émettant pas de CO₂, puisqu'il s'agit d'une ressource qui est de toute façon produite puis rejetée sans valorisation.

Environ 36 % (109,5 TWh) des combustibles consommés par l'industrie en France sont perdus en chaleur fatale, dont 52,9 TWh à plus de 100°C. À ce gisement s'ajoute 8,4 TWh de chaleur rejetés au niveau des UIOM, STEP et Data Center.

Par ailleurs, 16,7 TWh de chaleur fatale à plus de 60°C sont identifiés à proximité d'un réseau de chaleur existant, soit plus de 70% de l'énergie délivrée en 2013 par les réseaux de chaleur en France. Ce potentiel représente un peu plus de 1,66 millions équivalents logements.

2.1. USINES D'INCINÉRATION DE DÉCHETS

2.1.1. Généralités

Une unité de valorisation énergétique (UVE) est une Usine d'Incinération d'Ordures Ménagères (UIOM) permettant de produire de l'électricité et/ou de la chaleur.

La chaleur produite par la combustion des déchets peut être récupérée grâce à un échangeur de chaleur qui permet de réchauffer un circuit d'eau chaude, d'eau surchauffée ou de vapeur.

Les puissances et températures fournies peuvent être très importantes ce qui constitue un atout majeur pour les réseaux de chaleur. De plus, la puissance disponible est relativement constante toute l'année.

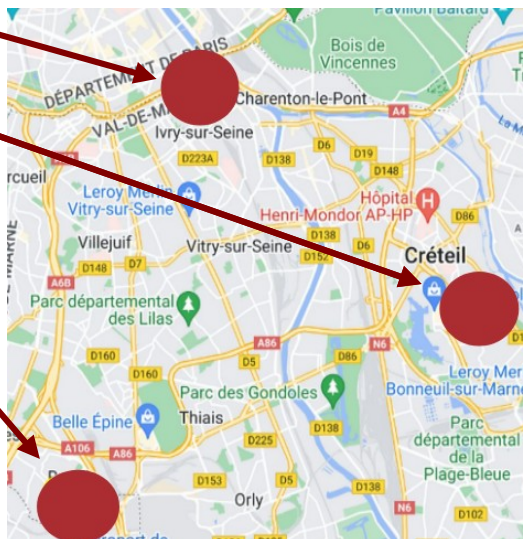
Par ailleurs, l'usine peut produire de l'électricité grâce à une turbine à vapeur.

Les usines d'incinération ont l'obligation de valoriser une part importante de la chaleur fatale (en réseau de chaleur ou en électricité) afin de conserver une TGAP (Taxe Générale sur les Activités Polluantes) réduite.

2.1.2. Application

Les incinérateurs présents à proximité sont les suivants :

- UVE Syctom Ivry/Paris 13 ;
- UVE de Créteil ;
- UVE de Rungis ;



L'intégralité de la chaleur valorisée par l'UVE d'Ivry est vendue au réseau CPCU.

L'UVE de Créteil alimente les Villes de Créteil, et prochainement Maisons-Alfort et la société Biospringer. La ressource est déjà entièrement valorisée, de plus la présence de la Seine entre Créteil et Vitry y ajoute une contrainte géographique.

L'incinérateur de Rungis alimente déjà le SICUCV à travers le réseau SEMMARIS, qui s'est engagée à fournir au moins 50 GWh/an, sauf en cas de force majeure, ou si l'incinérateur ne fournit pas la quantité suffisante, comme c'est le cas actuellement, suite à un incendie sur l'un des fours.

La quantité de chaleur disponible pourrait être amenée à évoluer par la suite, en fonction des orientations choisies par la SEMMARIS suite au schéma directeur en cours.

De plus, la quantité de chaleur valorisée pourrait être légèrement augmentée, pour une même puissance disponible, grâce à un système de stockage thermique (cf 5.Stockage thermique).

2.2. AUTRES SOURCES DE CHALEUR FATALE HAUTE TEMPÉRATURE

Aucune autre activité produisant de la chaleur à haute température n'a été repérée à proximité.

2.3. DATA-CENTERS

2.3.1. Généralités

Un centre de traitement des données ou un Data-center se présente comme un lieu où se trouvent différents équipements électroniques, des ordinateurs, des systèmes de stockage et des équipements de télécommunications. Comme son nom l'indique, il sert surtout à traiter les informations nécessaires aux activités d'une entreprise.

Le fonctionnement des appareils électroniques génère beaucoup de chaleur et ces appareils deviennent défectueux lorsque la température s'élève au-delà d'une certaine limite (les serveurs modernes (2012) peuvent supporter jusqu'à 45°C, à ne jamais dépasser). Afin de maintenir le lieu frais (à environ 20°C – 25°C) en tout temps, le data-center doit être équipé d'un système de refroidissement. Le refroidissement peut s'effectuer par le free cooling (refroidissement à air) et/ou par un refroidissement à eau.

Il est possible de récupérer la chaleur de ces fluides pour chauffer les bâtiments (logements, bureaux) aux alentours et éventuellement pour l'alimentation de l'eau chaude sanitaire.

Les groupes froids, pendant leur fonctionnement, génèrent la chaleur au niveau de leur condenseur. Cette chaleur est récupérable pour les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire des bâtiments aux alentours.

2.3.2. Application

La Ville de Vitry-sur-Seine héberge deux data-center : Scaleway DC2 et Scaleway DC3, du groupe Iliad.

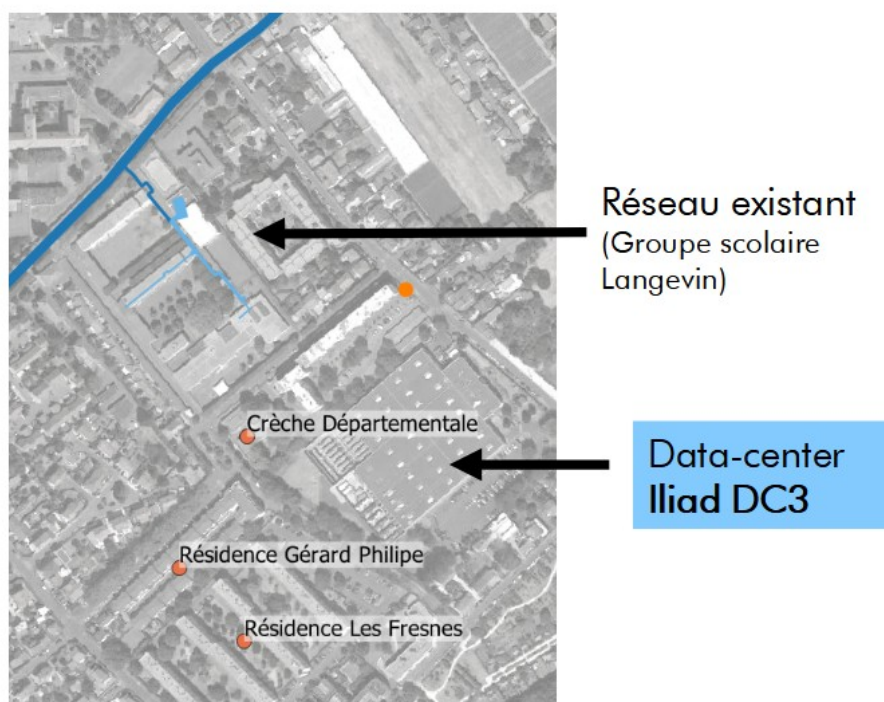


2.3.2.1. Data Center Scaleway DC3

Celui-ci se situe à proximité du groupe scolaire Langevin, comme indiqué sur la carte ci-dessous.

Le réseau existant, alimentant les établissements scolaires, fonctionne en régime basse température, ce qui facilite l'exploitation d'une source de chaleur comme le data-center.

De plus, il existe des prospectus de raccordement (bâtiments chauffés au gaz collectif, susceptibles d'être raccordés au réseau de chaleur) à proximité (voir points en orange ci-dessous).



Les besoins des bâtiments à proximité sont les suivants :

- Groupe scolaire Langevin : 620 kW ;
- Prospects : environ 1 500 kW
- ➡ Total : environ 1 120 kW

Iliad annonçait en 2011 une température disponible en sortie de refroidisseur de 63 °C, une puissance de 2MW, 7 200 MWh d'énergie récupérable et un prix de 13,25€/HT/MWh (à réviser en 2022). Les lois d'eau du réseau secondaire de chauffage de ces bâtiments étant sans doute d'environ 80°C par -7°C, voire plus, la mise en place d'une PAC est nécessaire pour relever la température en sortie de data center.

Le data-center couplé à la PAC pourrait ainsi couvrir une partie importante de ces besoins. L'appoint pourrait être réalisé :

- soit à l'aide d'une chaufferie gaz existante, quitte à augmenter la puissance gaz installée ;
- soit à l'aide du réseau existant (préférable a priori).

Le tableau suivant présente une estimation du coût de la chaleur résultant de cette installation :

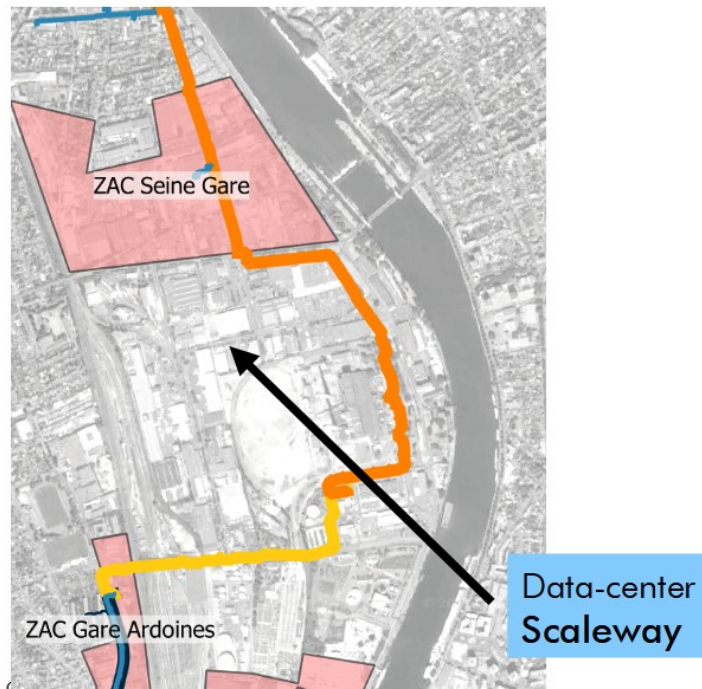
RACCORDEMENT AU DATA-CENTER DE FREE BILAN TECHNIQUE, ÉNERGÉTIQUE ET ÉCONOMIQUE PRÉVISIONNEL	
Bilan technique	
Température au départ du Data-center hors PAC	63 °C
Puissance de récupération disponible	2 MW
Période de valorisation	de nov. à mars
Bilan énergétique	
Besoins totaux de la boucle d'eau chaude	9 800 MWh
<i>dont chauffage</i>	7 840 MWh
<i>dont ECS</i>	1 960 MWh
Énergie produite pour alimenter la boucle	10 316 MWh
<i>dont Data Center + PAC</i>	7 553 MWh
<i>dont appoint réseau</i>	2 762 MWh
Gain sur le taux d'EnR	+2 points
Bilan économique	
Total des investissements	2 012 k€.HT
<i>dont extension réseau</i>	876 k€.HT
<i>dont local échange Data Center + PAC</i>	740 k€.HT
<i>dont sous-stations</i>	180 k€.HT
<i>dont MOE, assurances, aléas...</i>	216 k€.HT
Taux d'emprunt prévisionnel	3,5%
Durée prévisionnelle	20 ans
Total des charges supplémentaires par an	401 k€.HT
<i>Charges P1</i>	210 k€.HT
<i>dont chaleur fatale</i>	59 k€.HT
<i>dont élec PAC</i>	151 k€.HT
<i>Charges P2</i>	17 k€.HT
<i>Charges P3</i>	33 k€.HT
<i>Charges P4</i>	142 k€.HT
Coût du MWh	
Coût du MWh en sortie de l'ensemble Data Center + PAC	53,0 €.HT/MWh
Prix d'achat vapeur CVE	85,0 €.HT/MWh
Écart	-38%

La chaleur issue du data-center aurait un coût global moyen de l'ordre de 53€.HT/MWh.

Pour comparaison, la chaleur achetée à CVE coûte 85€.HT/MWh si l'on considère la part variable et la part abonnement, ou 45€.HT/MWh si on considère seulement la part variable. **En d'autres termes, en conservant l'abonnement CVE, le data-center ne permet actuellement pas de réaliser des économies par rapport à l'achat de vapeur CVE.**

2.3.2.2. Data Center Scaleway DC2

L'autre data-center de la Ville est située au Nord de l'ancienne centrale charbon, comme indiqué dans le plan ci-dessous :



Celui-ci est relativement éloigné du réseau existant et de toute habitation.

En revanche, il pourrait éventuellement contribuer à l'alimentation de la ZAC Seine Gare, dont les premiers lots verront le jour à partir de 2027, et située à environ 300 m.

En cas de volonté du SICUCV, il conviendrait de reprendre contact avec Iliad pour évaluer le potentiel de la ressource.

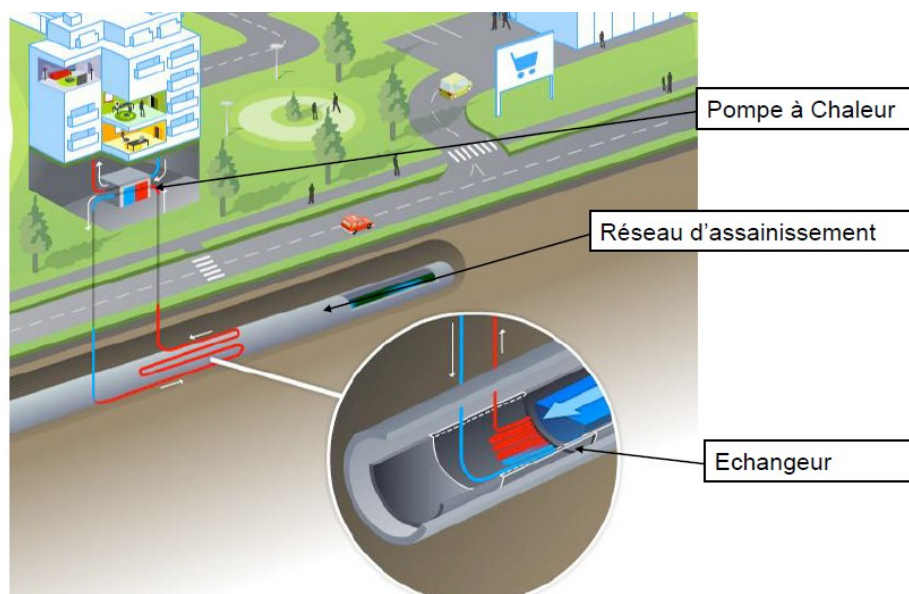
2.4. STATIONS D'ÉPURATION / EAUX USÉES

Cette technique vise à capter la chaleur des eaux usées en sortie de station d'épuration (STEP) (15°C), ou à l'intérieur des collecteurs de gros diamètre, via un échangeur de chaleur.

L'élévation de quelques degrés du fluide traversant l'échangeur est concentrée par une pompe à chaleur (PAC). La chaleur produite par la PAC est ensuite valorisée dans le réseau de chauffage.

À titre d'exemple, pour chauffer 10 000 habitants, il serait nécessaire de capter la chaleur des eaux usées d'environ 200 000 habitants (ordre de grandeur). Un territoire peut donc couvrir de l'ordre de 5 % de ses besoins grâce à ce dispositif.

Le schéma de principe est présenté ci-dessous :



Récupération de chaleur sur eau usée. Source : Lyonnaise des Eaux

2.4.1. Application

La station d'épuration la plus proche est située à Ivry, donc trop éloignée. Les plans des réseaux d'assainissement n'ont pas été reçus à ce jour.

3. GÉOTHERMIE PROFONDE

Il existe différents types de géothermie :

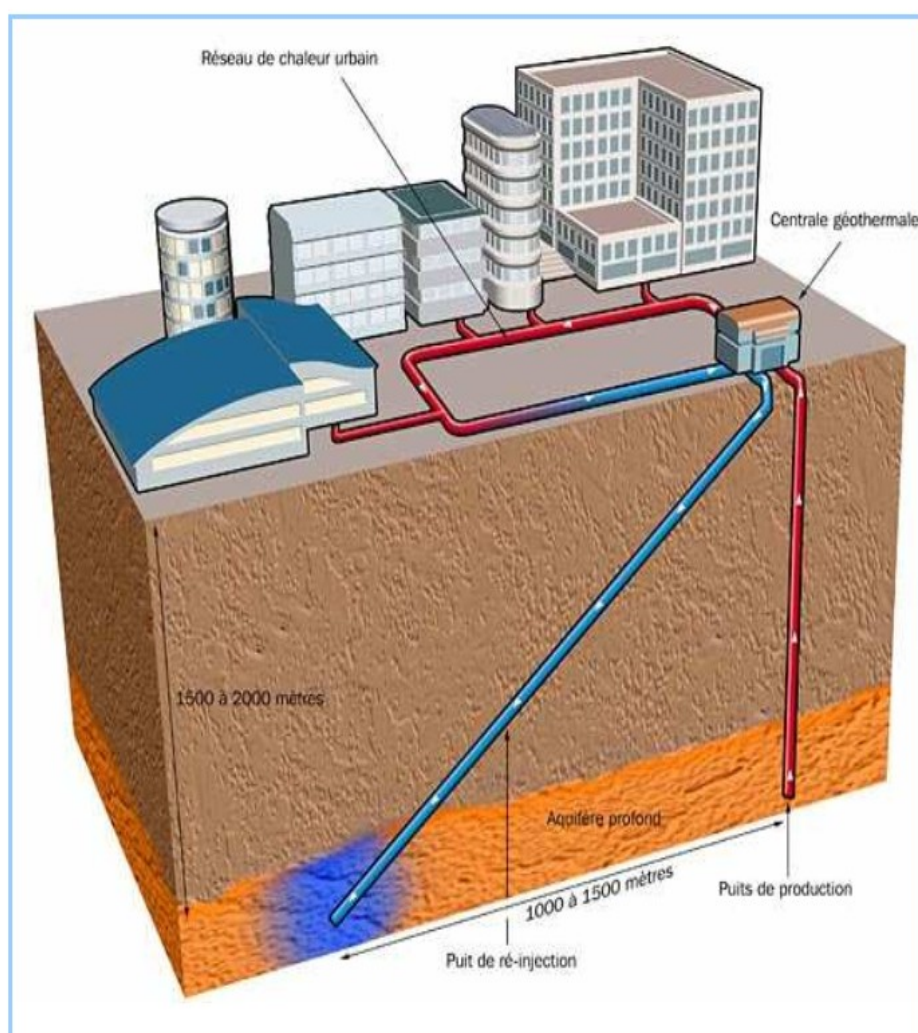
Géothermie	Température	Profondeur	Valorisation
très basse énergie	$< 30^{\circ}\text{C}$	Quelques mètres à quelques centaines de mètres	Nécessité d'augmenter la température par des PAC (Pompes à Chaleur) pour alimenter un réseau de chaleur.
basse énergie	$30^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$	1500 – 2000 m	Pour les réseaux d'eau chaude.
moyenne énergie	$90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$	2000 – 5000 m	Pour les réseaux d'eau chaude ou d'eau surchauffée ou pour la production de l'électricité.
haute énergie	$> 150^{\circ}\text{C}$	2000 – 5000 m (dans les roches chaudes fracturées)	Production de l'électricité.

A Choisy et Vitry, les géothermies basse et très basse énergie sont envisageables.

3.1. GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE

3.1.1. Généralités

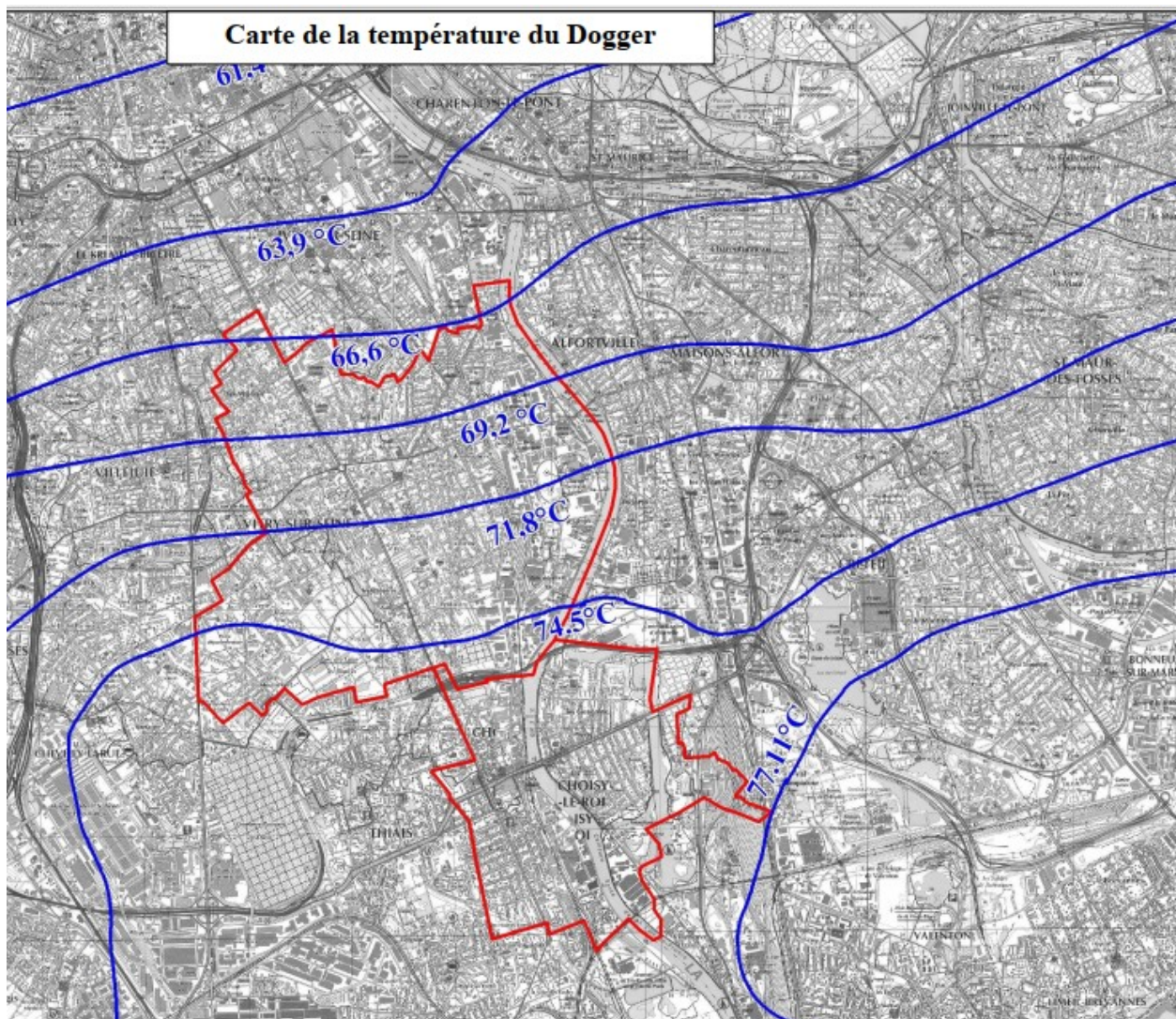
De l'eau à 70-80 °C existe dans une nappe souterraine appelée « Dogger », à 1 500–2 000 m de profondeur. Elle est acheminée en surface à l'aide de pompes, et passe par des échangeurs qui permettent de réchauffer le circuit d'un réseau de chaleur. Un appoint est nécessaire pour rehausser la température en hiver.



3.1.2. CARACTÉRISATION DE LA RESSOURCE

3.1.2.1. Température

Le rapport de caractérisation de la ressource établi par GEOTHER en 2011 (*Réf. GEA120011*) a permis d'établir que la température du fluide du Dogger pouvait être estimée entre 66 et 75 °C au droit de la commune de Vitry-sur-Seine. La variabilité de ce paramètre est directement liée à la différence de profondeur du toit du réservoir entre le nord et le sud de la commune. Au droit de Choisy-le-Roi, la température du fluide du Dogger est de l'ordre de 75 à 77°C.



Suite à cette étude, le SICUCV avait fait le choix de différer la mise en place de la géothermie profonde, la construction des nouveaux quartiers n'étant pas assez avancée pour rentabiliser l'investissement.

Depuis l'étude menée en 2011, un permis de recherche a été déposé par Alfortville, sur une surface recouvrant partiellement le territoire de Choisy et Vitry, comme indiqué sur la figure suivante :

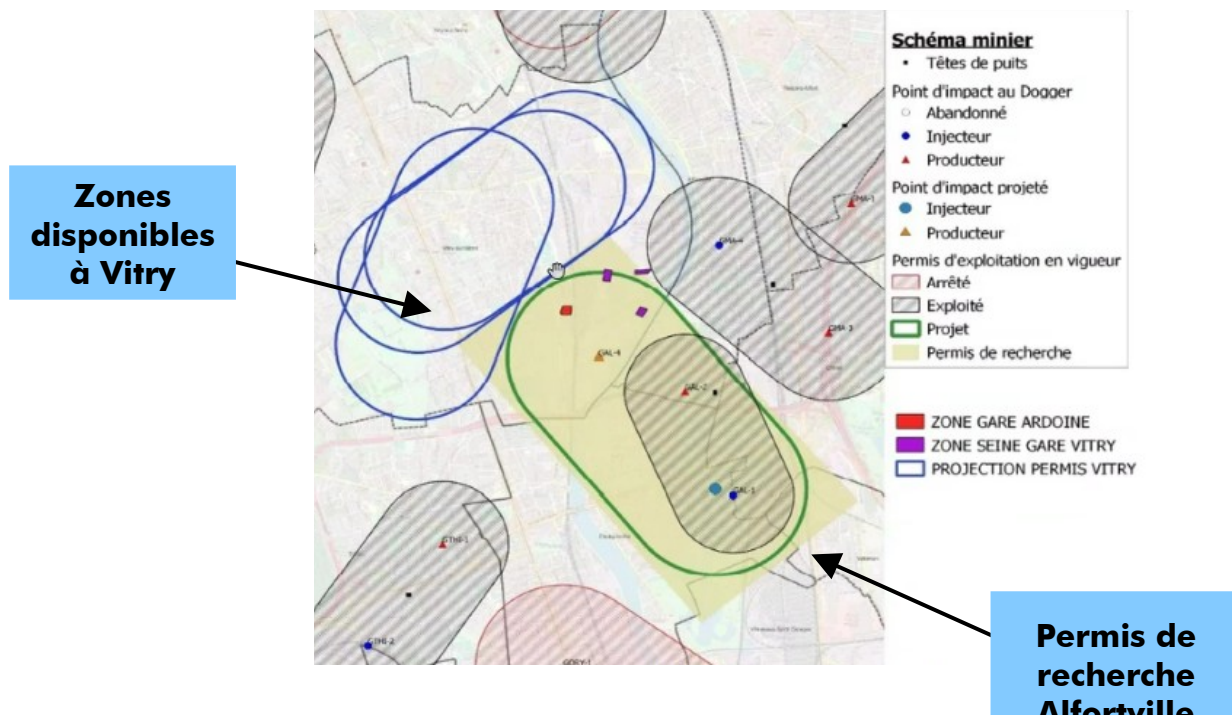
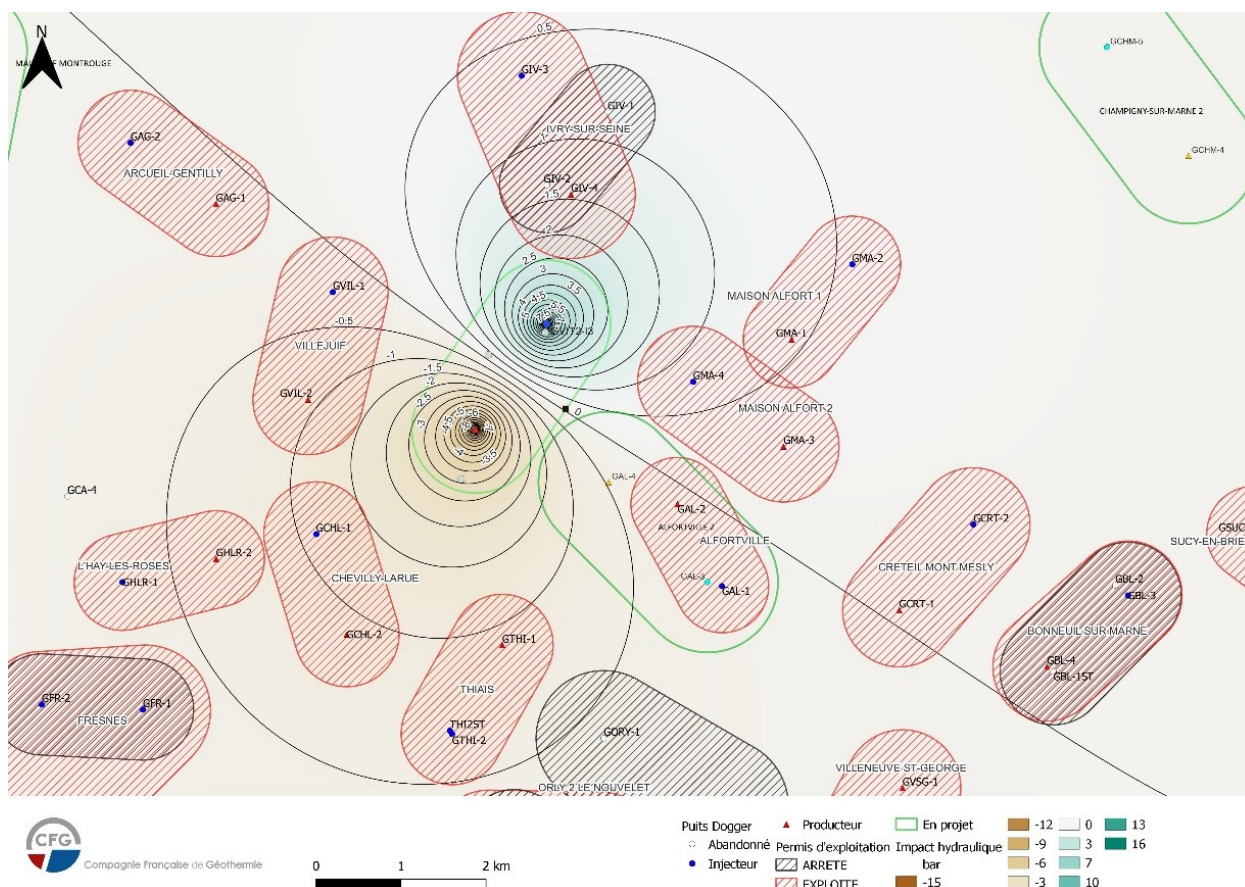


Figure 1: Schéma minier proposé et impact hydraulique

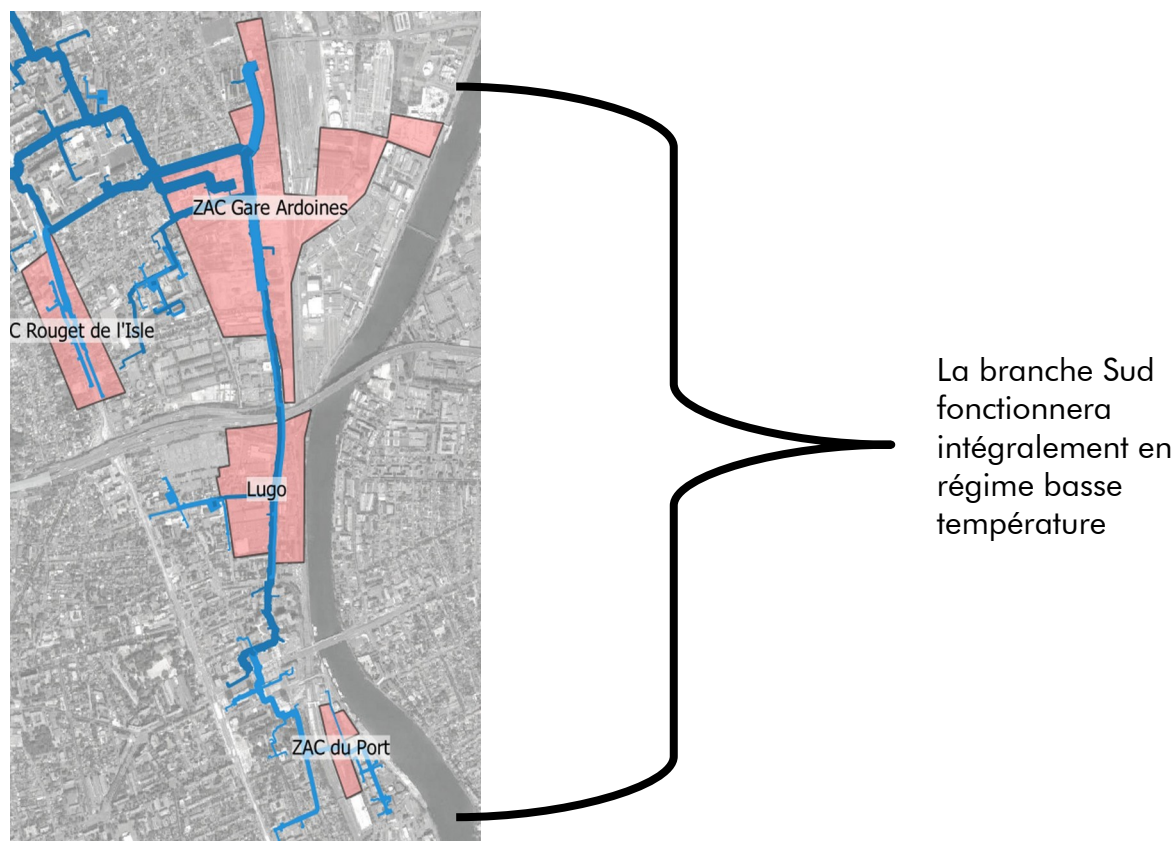


3.1.2.2. Débit

L'étude GEOTHER a montré que la présence de doublets géothermiques voisins impose de limiter le débit à **225 m³/h**.

3.1.2.3. Besoins

Suite aux travaux en cours, l'intégralité de la branche Sud du réseau (voir carte ci-dessous) fonctionnera en régime basse température (température maximale de 110°C), ce qui est favorable à l'utilisation de la ressource géothermale basse énergie.



De nombreux projets immobiliers ont lieu au niveau de cette branche :

- La ZAC Gare Ardoines, principalement ;
- Le LUGO ;
- La ZAC du Port.

Les besoins énergétiques sur cette branche sont donc en constante évolution. Ils sont récapitulés dans le tableau ci-dessous¹ :

¹ Le rendement d'un réseau basse pression se situe généralement autour de 90-95 °C

Besoins énergétiques en sous-station pour 2026 – Branche BP Sud

		Existant 2022	2023-2026	Total fin 2026	Besoin PROD (rendement 90% - fst 55%)
Consommation chaleur	MWh/an	29 100	20 460	49 560	55 066
si -50% développement			10 230	39 330	43 700
Puissance souscrite	kW	23 115	15 075	38 190	21 005
si -50% développement			7 538	30 653	16 859

Besoins énergétiques en sous-station pour 2038 – Branche BP Sud

		Autres lots branche SUD (2038)	Estimation 2038	Besoin PROD cumulé (rendement 90% - fst 55%)	ZAC Seine-Gare (branche Nord éventuelle)
Consommation chaleur	MWh/an	23 569	73 128	81 254	28 967
si -50% développement		11 784	51 114	56 793	14 484
Puissance souscrite	kW	16 317	54 507	29 979	18 833
si -50% développement		8 158	38 811	21 346	9 416

Ainsi, les besoins actuels représentent 29 GWh/an (23 MW), et seront amenés à augmenter à 40-50 GWh/an en 2026 (30-40 MW), puis potentiellement jusqu'à 73 GWh/an après 2026 (env. 55 MW).

La production d'énergie en centrale devra atteindre 55 GWh/an en 2026 et 81 GWh/an en 2038.

La ZAC Seine-Gare, située au Nord, disposera dans un premier temps de ses propres moyens de production (biomasse, géothermie superficielle, appoint CPCU et gaz), mais pourrait potentiellement être raccordée à la géothermie (+ 29 GWh/an, 19MW).

3.1.2.4. Phasage

Un doublet (1 forage d'extraction + 1 forage de réinjection) au Dogger, permet de fournir en moyenne 50 GWh/an.

Une étude économique a permis d'estimer le coût de la chaleur global chaque année entre 2026 et 2065 selon 3 scénarios :

- Démarrage de la géothermie en 2026 ;
- Démarrage de la géothermie en 2031 ;
- Démarrage de la géothermie en 2036 ;

en prenant en compte les éléments suivants :

- mise en service progressive des nouveaux bâtiments (ZAC Ardoines, Lugo, ZAC du Port) ;
- coût global évolutif de la géothermie (incluant l'investissement et les coûts d'exploitation) ;
- évolution des prix de la chaleur issue des réseaux SEMMARIS et Ville de Paris.

Le tableau suivant présente les coûts de la fourniture de chaleur pour le réseau SICUCV sur 40 ans (durée de vie de la géothermie, cf. 3.1.3) pour les 3 scénarios

Scénario	Montant (M€.HT)
Démarrage de la géothermie en 2026	866
Démarrage de la géothermie en 2031	880
Démarrage de la géothermie en 2036	897

Malgré l'incertitude sur les coûts à cette échelle de temps, l'étude montre que la mise en place de la géothermie dès 2026 (début de la nouvelle DSP) permet de réaliser une économie importante (3,5 %) par rapport à un démarrage en 2036, car les besoins de chaleur seront déjà suffisants pour rentabiliser l'investissement.

3.1.2.5. Site de forage

Le forage nécessite une superficie libre de 5 000 m². L'emplacement pressenti actuellement est situé au Sud du Stade Gabriel Péri.



Emplacement
pressenti pour le
site de forage

3.1.2.6. Puissance disponible et énergie valorisée

La puissance de chauffe fournie par la géothermie dépend :

- du débit disponible ;
- de la température du puits ;
- de la température de retour du réseau de distribution ;
- de la puissance appelée par les abonnés.

Ainsi, le raccordement des futures ZAC permettront d'augmenter la puissance fournie par la géothermie, pour deux raisons :

- les régimes de température des bâtiments neufs sont plus bas que pour les bâtiments existants, ainsi les températures de retour seront abaissées, ce qui aura pour effet d'augmenter la puissance disponible ;
- les appels de puissance seront de plus importants.

Ainsi, les simulations montrent que la puissance maximale fournie par ce projet de centrale évolue entre 6 et 7 MW entre 2026 et 2038 selon l'avancement des ZAC, l'énergie fournie évolue entre 40 et 50 GWh/an.

3.1.3. Durée de vie

La géothermie au Dogger a une durée de vie d'environ 30-40 ans, car les tubages du forage peuvent se corroder au fur et à mesure, et la température du puits producteur peut parfois baisser progressivement en raison du développement de la bulle froide au niveau du puits de réinjection. Un nouveau forage est ensuite nécessaire pour continuer à exploiter la géothermie.

3.1.4. Pré-chiffrage économique

Le tableau suivant présente un premier calcul en coût global de cette énergie :

BILAN EN COUT GLOBAL DE LA SOLUTION GEOTHERMIQUE	
Bilan énergétique	
	2030
Énergie produite (sortie chaufferie)	39 000 MWh
Énergie consommée (pompe électrique)	3 900 MWh
Bilan économique	
INVESTISSEMENTS	k€.HT
DOUBLET AU DOGGER	13 108 k€.HT
CENTRALE GEOTHERMIQUE	2 208 k€.HT
Subventions attendues	-4 595 k€.HT
TOTAL INVESTISSEMENTS SANS SUBVENTIONS	15 316 k€.HT
TOTAL INVESTISSEMENTS, SUBVENTIONS DEDUITES	10 721 k€.HT
Taux d'emprunt prévisionnel	4,5%
Durée prévisionnelle	30 ans
Tarif électricité	150 €/HT/MWh
Total des charges supplémentaires par an	2 009 k€.HT
Charges P1	585 k€.HT
Charges P2	306 k€.HT
Charges P3	459 k€.HT
Charges P4	658 k€.HT
Coût du MWh	
Coût du MWh en sortie de l'ensemble Géothermie	51,5 €/HT/MWh

Le coût global de la chaleur géothermique (incluant les achats d'énergie, les coûts d'exploitation et l'amortissement des investissements) est estimé à environ **51 €/HT/MWh**, à comparer au tarif r1 de la vapeur du réseau de Paris, actuellement à 42 €/HT/MWh mais qui sera amenée à augmenter de manière substantielle dans les prochaines années.

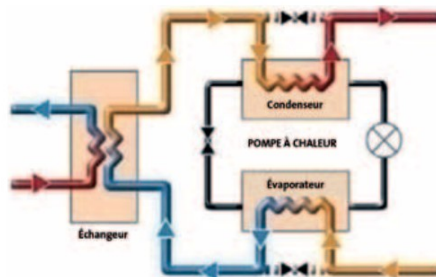
Malgré le débit limité lié aux géothermies voisines, cette solution reste économiquement avantageuse et stratégique car faiblement dépendante du cours des énergies.

3.1.5. Mise en place d'une pompe à chaleur

Afin de compenser le débit limité du puits, la mise en place d'une pompe à chaleur avec **condenseur en parallèle avec l'échangeur** permet d'augmenter le débit de la centrale géothermique, comme indiqué dans le schéma ci-dessous :

■ Condenseur en série avec l'échangeur

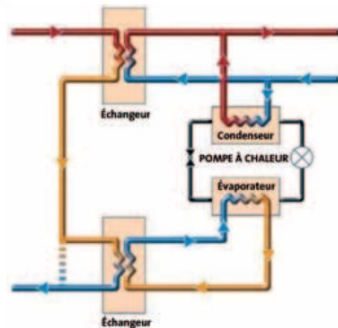
L'évaporateur de la PAC refroidit le retour du circuit géothermique. Les calories prélevées sont transférées au niveau du condenseur qui augmente ainsi la température de départ du circuit géothermique.



Pompe à chaleur
de plus de 13 m de long des-
tinée au chauffage de grands
ensembles (© Friotherm)

■ Condenseur en parallèle avec l'échangeur

L'évaporateur de la PAC refroidit le retour géothermal après échangeur et transfère les calories prélevées sur un circuit dérivé du retour du circuit géothermique. Cette solution consiste en fait à augmenter artificiellement le débit et donc, la puissance de l'installation.



Condenseur en série
avec l'échangeur

Condenseur en parallèle
avec l'échangeur

Ainsi, une pompe à chaleur de 3,0 MW permettrait d'augmenter le débit de 225 m³/h à 375 m³/h, avec les régimes de température prévus pour 2026. En 2038, la PAC devra avoir une capacité de 3,8 MW pour atteindre la même performance, compte-tenu de l'évolution du régime de température.

La PAC dimensionnée ainsi permettrait d'augmenter l'énergie produite par la centrale géothermique d'environ 10 GWh/an en 2026, et 17 GWh/an en 2038, mais le surcoût lié à l'investissement (environ 500 k€.HT) et à la consommation d'électricité compense le gain de production géothermique. En effet, le tarif reste équivalent à la solution sans PAC (environ 52 €/HT/MWh), comme précisé dans le tableau ci-dessous :

BILAN EN COUT GLOBAL DE LA SOLUTION GEOTHERMIQUE

Bilan énergétique

	2030
Énergie produite (sortie chaufferie)	48 000 MWh
<i>dont géothermie</i>	40 900 MWh
<i>dont PAC</i>	7 100 MWh
COP moyen PAC	4,0
Électricité consommée (pompe électrique)	4 090 MWh
Electricité consommée (pompe à chaleur)	1 775 MWh

Bilan économique

INVESTISSEMENTS	k€.HT
DOUBLET AU DOGGER	13 108 k€.HT
CENTRALE GEOTHERMIQUE	2 208 k€.HT
POMPE A CHALEUR	2 000 k€.HT
Subventions attendues	-4 595 k€.HT
TOTAL INVESTISSEMENTS SANS SUBVENTIONS	17 316 k€.HT
TOTAL INVESTISSEMENTS, SUBVENTIONS DEDUITES	12 721 k€.HT

Taux d'emprunt prévisionnel	4,5%
Durée prévisionnelle	30 ans
Tarif électricité	150 €.HT/MWh
Total des charges supplémentaires par an	2 527 k€.HT
<i>Charges P1</i>	880 k€.HT
<i>Charges P2</i>	346 k€.HT
<i>Charges P3</i>	519 k€.HT
<i>Charges P4</i>	781 k€.HT

Coût du MWh

Coût du MWh en sortie de l'ensemble Data Center + PAC	52,6 €.HT/MWh
---	---------------

3.2. GÉOTHERMIE SUR NAPPE

La géothermie superficielle, ou géothermie sur nappe, repose sur l'exploitation des aquifères superficiels, c'est à dire à des profondeurs relativement faibles (quelques centaines de mètres au plus). Les températures de ce type d'aquifère sont très basses (environ 10-15°C) et nécessitent l'utilisation de pompes à chaleurs.

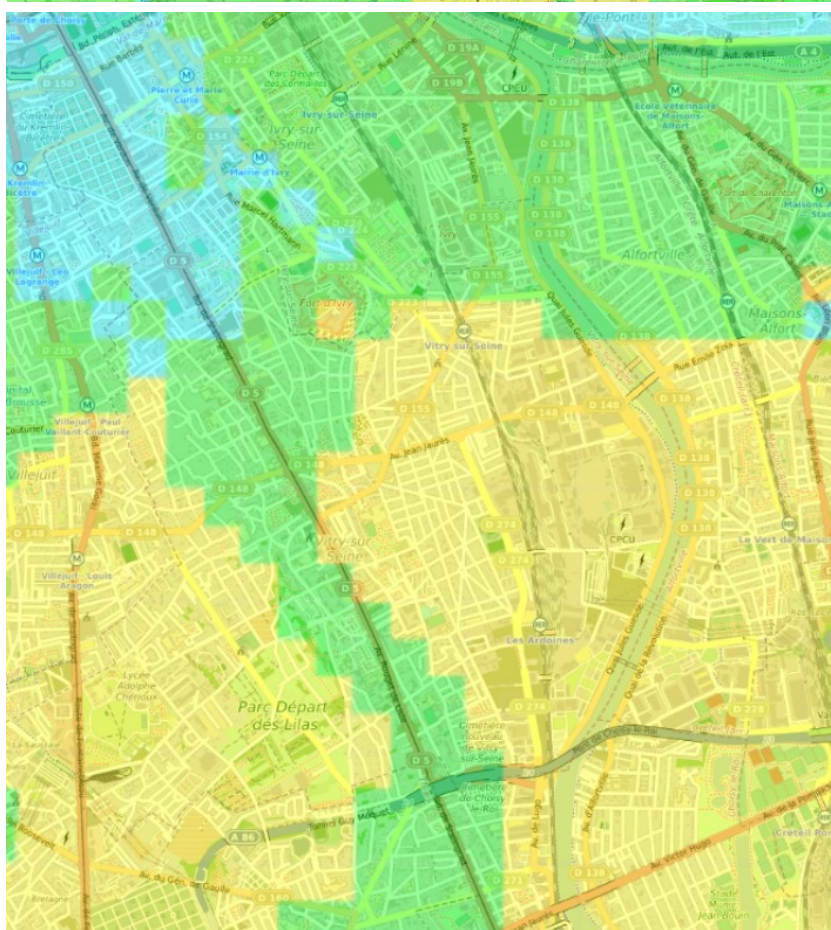
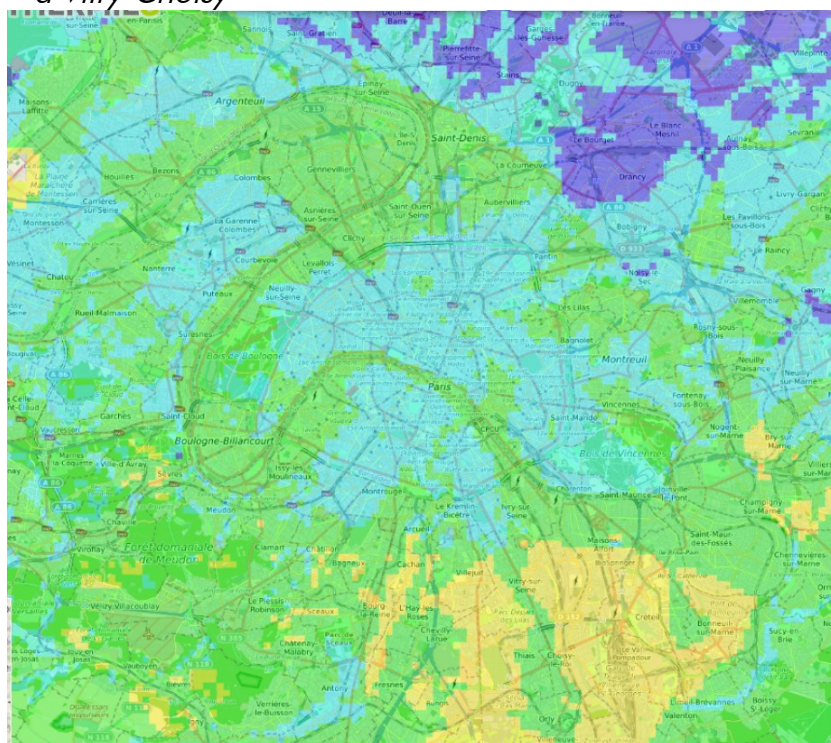
Ce type de géothermie est surtout utilisé pour le chauffage de bâtiments basse consommation, le rafraîchissement et l'alimentation en eau chaude sanitaire de maisons individuelles ainsi que pour des applications tertiaires et des locaux collectifs.

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), établissement public à caractère industriel et commercial, et référence en matière de géologie, a développé un atlas permettant d'évaluer le potentiel géothermique sur l'ensemble du territoire français. A Choisy et Vitry, le potentiel de la géothermie sur nappes est qualifié de moyen à faible, comme indiqué sur les cartes ci-après.

Le potentiel est évalué en fonction de la profondeur de la nappe (liée à la température), son épaisseur, sa transmissivité et ses qualités chimiques. Un potentiel qualifié de faible n'est pas inexploitable, mais correspond à une puissance plus limitée.

Le déploiement de ce type de géothermie est prévu pour alimenter le futur réseau de chaleur indépendant de la ZAC Seine Gare. Les autres projets immobiliers (Gare Ardoines, Lugo, ZAC du Port) se concentrent principalement sur la branche Sud, pour laquelle la géothermie profonde présente un potentiel technico-économique supérieur à la géothermie sur nappe.

Potentiel de la géothermie sur nappe en Île-de-France et à Vitry-Choisy



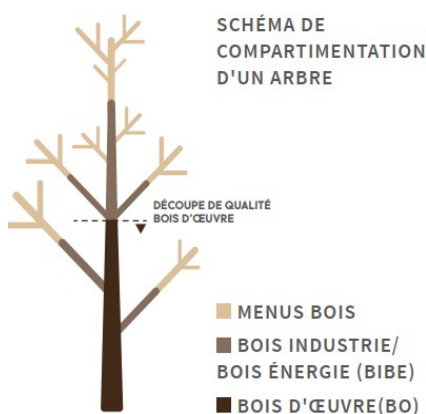
4. BIOMASSE

4.1. GÉNÉRALITÉS

La biomasse désigne l'ensemble de la matière végétale. C'est une véritable réserve d'énergie, captée à partir du soleil grâce à la photosynthèse. Dans le cas des réseaux de chaleur, elle peut être valorisée par combustion dans une chaudière.

Le bois-énergie est un sous-produit issu des entreprises de l'industrie du bois, de l'entretien de la forêt, du bocage, des espaces verts, des haies urbanisées, et d'une valorisation de bois en fin de vie (déchets industriels banals de bois non traités ou faiblement traités).

Le bois-énergie est souvent un sous-produit de l'industrie du bois d'œuvre, comme expliqué dans le schéma ci-dessous :



Source : ADEME

En effet le bois d'œuvre, bien plus cher que le bois énergie, est la ressource principale recherchée lors de la coupe d'un arbre. Le bois-industrie/bois-énergie, est valorisé en tant que sous-produit, ou co-produit.

Les menus bois (MB) correspondent aux petites branches de moins de 7 cm de diamètre. Ils peuvent être valorisés en plaquette pour l'énergie, mais ils sont le plus souvent laissés en forêt pour des raisons économiques et environnementales (pauvreté des sols, sensibilité des sols au tassement).

Le bois-énergie reste de loin la première source d'énergie renouvelable en France. En 2019, il a représenté une production de 114 térawattheures (TWh) soit 35,8 % de la

production primaire renouvelable². La production est stable depuis plus de trois décennies.

Une étude de l'ADEME³ menée en 2015 a montré que la forêt française est capable de supporter une augmentation de 30 % de la récolte, ce qui représenterait jusqu'à 40 TWh de bois énergie supplémentaires. Cela suppose l'exploitation de parcelles non-exploitées ou faiblement exploitées, ainsi que l'augmentation des superficies forestières.

En ce qui concerne les déchets de bois, ils sont classés en 2 catégories :

- le bois de classe A : déchets de bois d'emballage non traités et non peints (palettes, caisses, cagettes, plaquettes...) ;
- le bois de classe B déchets de bois non dangereux, faiblement traités, peints ou vernis. Ces déchets correspondent aux bois d'ameublement (planches, contre-plaquée,...) et aux bois de démolition.

Quelle que soit sa nature, le combustible doit respecter différents critères (par exemple : humidité, Pouvoir Calorifique Inférieur, granulométrie, taux de poussières, corps étrangers, taux de cendres, sécurité d'approvisionnement). La technologie de la chaudière (foyer, échangeurs, stockage, alimentation...) est différente selon la composition du combustible utilisé.

Les chaudières de grande capacité (>1MW) peuvent fonctionner avec des plaquettes forestières, combustible dont le prix est inférieur au gaz et plus stable. Les chaudières de plus petite puissance fonctionnent le plus souvent au granulé de bois.

Les émissions de CO₂ d'une chaudière biomasse liées à la combustion sont considérées comme nulles (étant donné que le carbone émis lors de la combustion de végétaux a été précédemment capté dans l'air par ces mêmes végétaux). Les émissions totales, essentiellement liées au transport et à la production des combustibles sont relativement faibles par rapport au gaz par exemple.

2 <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2020>

3 www.ademe.fr/disponibilites-forestieres-lenergie-materiaux-a-lhorizon-2035

4.2. TARIFS

Le bois reste le combustible dont le prix est le plus bas et le plus stable depuis les 10 dernières années :

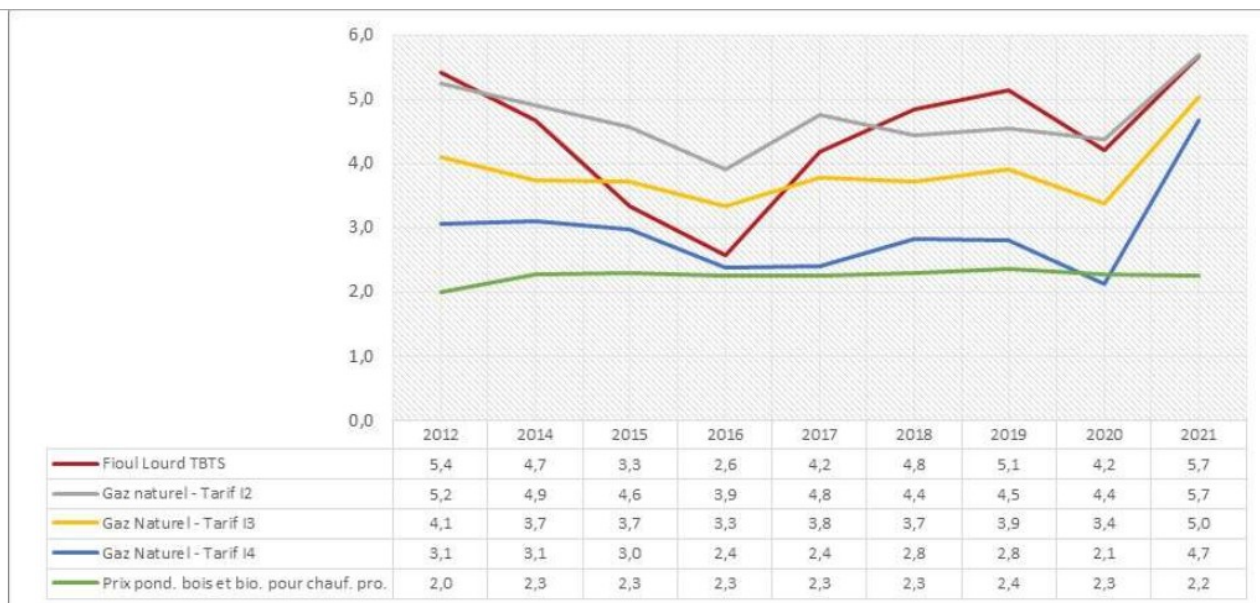
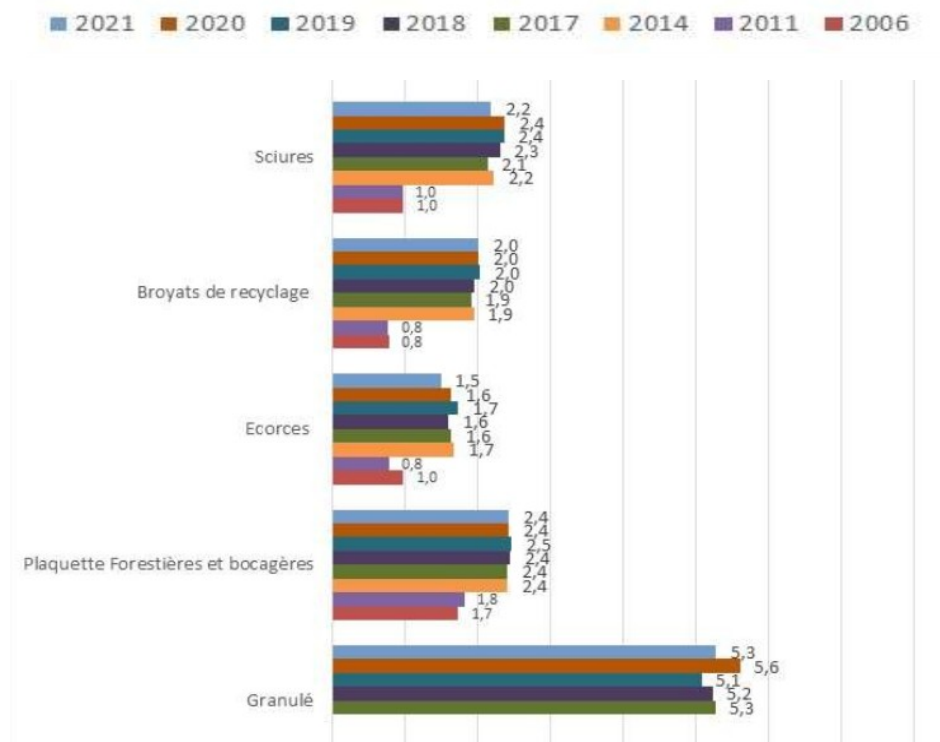


Figure 1: Evolution comparée des prix du gaz naturel, du fioul et des combustibles bois et biomasse (livrés, HT, c€/kWh)
Source : ADEME pour les prix bois et biomasse, Eurostat – MTES pour le gaz naturel et FOL
Pondération Bois et biomasse : Plaquettes 71,5%, Ecorces : 5,8%, Sciures 11,3%, Broyats : 11,4%

Le graphe suivant indique le tarif de différents combustibles bois :

Figure 2: Prix du combustible bois pour les collectivités et l'industrie (c€ HTVA/KWh PCI - prix livré). Source: ADEME



4.3. CONTRAINTES D'IMPLANTATION

Cette technologie nécessite des livraisons régulières de combustible, généralement par rotations de camions, il faut donc prévoir que la chaufferie bois soit accessible pour ceux-ci. Elle nécessite également une cheminée, qui peut être habillée sur le plan architectural.

De plus, la chaufferie nécessite un espace important, notamment pour le stockage des combustibles. Pour une chaufferie de 35 MW, cet espace est estimé à environ 8 000 m² (aire de livraison de camions incluse).

4.4. RÉGLEMENTATION

En raison des émissions de fumées potentiellement polluantes, l'installation d'une chaufferie bois de puissance nominale supérieure ou égale à 0,1 MW est soumise à déclaration, enregistrement ou autorisation selon la puissance nominale et le type de combustible utilisé (biomasse « propre » ou biomasse « déchets »), comme indiqué

dans le tableau suivant, issu du décret n°2013-814 du 11 septembre 2013 modifiant la nomenclature des installations classées :

NOMENCLATURE DES INSTALLATIONS DE COMBUSTION (2910) DE BIOMASSE						
PUISSANCE NOMINALE	2910 – A BIOMASSE « PROPRE »			2910 – B BIOMASSE « DÉCHETS »		
	PRODUITS VÉGÉTAUX	DÉCHETS VÉGÉTAUX	DÉCHETS DE LIÈGE	DÉCHETS IAA*	DÉCHETS DE PÂTE VIERGE	DÉCHET DE BOIS PEU TRAITÉ**
Inférieure à 0,1 MW	NON CLASSÉ			NON CLASSÉ		
Comprise entre 0,1 MW et 1 MW	NON CLASSÉ			ENREGISTREMENT		
Comprise entre 1 MW et 20 MW	DÉCLARATION					
Supérieure ou égale à 20 MW	AUTORISATION			AUTORISATION		

*industrie agro-alimentaire

**exempts de composés organiques halogénés ou de métaux lourds

La réglementation encadrant les installations de combustion de biomasse est la suivante :

- Déclaration : arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n°2910 (Combustion) modifié par l'arrêté du 26 août 2013 ;
- Enregistrement : arrêté du 24 septembre 2013 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à enregistrement sous la rubrique n°2910 (Combustion) ;
- Autorisation : arrêté du 26 août 2013 relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910 et de la rubrique 2931.

4.5. APPLICATION

Le tableau page suivante présente le bilan de l'installation d'une chaufferie biomasse de 35MW sur le réseau de chaleur du SICUCV. Il a été retenu un prix d'achat du combustible bois de 30 €/HT/MWh (en sortie de chaudière), tenant compte du rendement de la chaudière.

INSTALLATION D'UNE CHAUFFERIE BIOMASSE BILAN TECHNIQUE, ÉNERGÉTIQUE ET ÉCONOMIQUE PRÉVISIONNEL

Bilan technique

Puissance de la chaufferie bois	35 MW
Surface nécessaire à l'implantation de la chaufferie (dont aire camions)	8 000 m ²

Bilan énergétique

Énergie annuelle produite par la chaufferie bois	126 365 MWh
Couverture énergétique	57 %

Bilan économique

Total des investissements (k€.HT)	22 932 k€.HT
<i>dont chaudière bois et équipements</i>	17 000 k€.HT
<i>dont génie civil</i>	11 000 k€.HT
<i>dont MOE, assurances, aléas...</i>	4 760 k€.HT
<i>dont subventions</i>	-9 828 k€.HT
Prix d'achat du combustible bois en sortie de chaudière	30 €.HT/MWh
Taux d'emprunt prévisionnel	4%
Durée prévisionnelle	20 ans
Total des charges supplémentaires par an	6 424 k€.HT
<i>Charges P1 annuelles</i>	3 791 k€.HT
<i>Charges P2 annuelles</i>	510 k€.HT
<i>Charges P3 annuelles</i>	510 k€.HT
<i>Charges P4 annuelles</i>	1 614 k€.HT

Coût du MWh

Coût du MWh en sortie de chaufferie bois	50,8 €.HT/MWh
Prix d'achat vapeur CVE	85,0 €.HT/MWh
Écart	-40%

Le coût global du MWh en sortie de chaufferie bois est estimé à environ 51 €.HT/MWh, soit une économie de 45 % par rapport au tarif d'achat de la vapeur CVE (85€.HT/MWh), qui serait alors substituée par la chaleur issue de la chaufferie bois.

Ainsi, l'installation d'une chaufferie bois peut permettre de renforcer le taux d'EnR (d'environ 33 points pour 25 MW) du réseau tout en diminuant le prix de vente de la chaleur. Cette pré-étude de faisabilité devra néanmoins être confirmée par une étude plus approfondie si cette solution devait être mise en œuvre.

La chaudière à bois présente donc un avantage compétitif par rapport à CVE/CPCU notamment. En revanche, sa faisabilité nécessite de trouver un emplacement adéquat suffisamment spacieux, accessible pour des livraisons fréquentes par camion, et compatible avec la disposition du réseau de chaleur.

5. STOCKAGE THERMIQUE

5.1. GÉNÉRALITÉS

Lorsque la production de chaleur est supérieure aux besoins des usagers, le surplus de chaleur produite peut être stocké, puis déstocké lorsque la production de chaleur est inférieure aux besoins des usagers.

Un stockage peut être pertinent pour :

- Lisser la puissance de pointe de production : limiter le recours aux générateurs de pointe et diminuer la puissance installée ;
- Lisser la puissance distribuée dans le cas d'un stockage décentralisé, proche des consommateurs, et ainsi réduire les pertes de charges pour des tronçons de réseau congestionnés ;
- Favoriser le fonctionnement à puissance nominale des chaudières et dépasser la limite technique de fonctionnement ;
- Optimisation économique et environnementale du réseau de chaleur en favorisant le fonctionnement de certains générateurs en fonction de leur coût (prix combustible, charges d'exploitation,...) et/ou de leurs émissions de CO₂ ;
- Flexibilité et rentabilité économique des cogénérations avec un pilotage dépendant peu des besoins thermiques et en lien direct avec les conditions d'achat de l'électricité. Ceci permet de ne pas effacer la production à partir des ENR&R, le surplus d'énergie étant stocké ;
- Sécurisation de la fourniture de chaleur en cas de panne de générateur ;
- Récupération de la chaleur fatale non valorisable sans stockage ;
- Valorisation des ENR&R intermittentes (solaire thermique) dont la production est décorrélée des besoins réels du réseau.

5.2. TECHNOLOGIES EXISTANTES

	THERMOCLINE	SONDES GEOTHERMIQUES	SUR AQUIFERE	EN FOSSE	EN RESERVOIR
Descriptif	Cuve utilisant la stratification mécanique entre la couche chaude et la couche froide.	Stockage de la chaleur dans un sol très rocheux ou saturé en eau via des sondes dans lesquelles un fluide caloporteur circule en boucle fermée.	Stockage de la chaleur dans un aquifère à travers le forage de 2 puits (exhaure et injection).	Trou au sol dans lequel est stocké de la chaleur dans de l'eau ou dans une matière minérale (sable, graviers) à l'aide d'un échangeur placé dans la fosse. L'ensemble est recouvert d'une membrane isolante.	Réservoir aérien ou enterré dans lequel la chaleur est stockée dans de l'eau pressurée ou à pression atmosphérique.
Durée de stockage	Journalier	Inter-saisonnier	Inter-saisonnier	Inter-saisonnier	Inter-saisonnier
Température	Non limitée	< 90 °C	50 °C	< 90 °C	Non limitée
Volume	Jusqu'à quelques milliers de m3	> 100 000 m3	> 100 000 m3	< 200 000 m3	1 000 – 50 000 m3
Densité de stockage	35-40 kWh/m3	5 – 15 kWh/m3	15 – 20 kWh/m3	15 – 35 kWh/m3	35 kWh/m3
Coût (projets allemand)		50 – 100 €/m3	< 50 €/m3	80 – 400 €/m3	450 – 500 €/m3
Type	Centralisé et décentralisé	Centralisé	Centralisé	Centralisé	Centralisé et décentralisé
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> -Conception simple -Faible coût de maintenance -Décharge rapide 	<ul style="list-style-type: none"> -Peu de pertes thermiques -Stockage peu coûteux -Volume très important -Modulation des besoins par l'ajout/retrait de sondes 	<ul style="list-style-type: none"> -Peu de pertes thermiques -Stockage peu coûteux -Volume très important -Faible emprise au sol 	<ul style="list-style-type: none"> -Stockage peu coûteux -Faible coût de maintenance (eau) -Intégration paysagère (eau-sable et eau-gravier) -Volume très important 	<ul style="list-style-type: none"> -Très efficace -Peu de pertes thermiques -Volume important -Montée en puissance rapide -Flexibilité de la puissance développée
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> -Risque d'une mauvaise stratification -Risque lié à la pression -Équipement auxiliaire pour s'adapter à la pression du réseau - Passage dans la catégorie des ESP 	<ul style="list-style-type: none"> -Nécessite des conditions géologiques particulières -Densité de stockage faible -Forte inertie -Pertes thermiques modérées 	<ul style="list-style-type: none"> -Nécessite des conditions géologiques particulières -Densité de stockage faible -Température limitée pour éviter le risque de modification de la géologie et de l'aquifère -Pertes thermiques modérées 	<ul style="list-style-type: none"> -Inertie du gravier -Maintenance coûteuse (eau-gravier et eau-sable) -Investissement élevé pour la couverture isolante extérieure -Emprise au sol élevée (eau) -Pertes thermiques élevées 	<ul style="list-style-type: none"> -Investissement élevé lié à l'isolation et au revêtement -Emprise au sol -Risque lié à la pression -Adaptations techniques liées à la pression - Passage dans la catégorie des ESP

5.3. APPLICATIONS AU CAS DU RÉSEAU DU SICUCV

S'agissant du stockage au sol et sur aquifère, des études géologiques et hydrogéologiques approfondies sont nécessaires afin de vérifier la faisabilité d'un stockage souterrain. Les températures admissibles pour ce type de stockage restent néanmoins limitées (90 °C pour les sondes géothermiques et 50 °C sur aquifère) afin de ne pas altérer la composition géologique et hydraulique du sous-sol.

Cette solution bénéficie toutefois d'un investissement faible par volume stocké et peut contenir un volume de stockage considérable, idéal pour un fonctionnement inter-saisonnier. Le stockage de l'intégralité de l'énergie dissipée en été, requiert une capacité du stockage souterrain considérable ($> 100\,000\text{ m}^3$).

S'agissant du stockage en fosse, la température de stockage est également limitée et l'emprise au sol d'un tel ouvrage est à considérer.

Le thermocline et le réservoir confèrent une meilleure densité énergétique qui permettrait une valorisation complète de la chaleur. Utilisés de manière décentralisée ou centralisée, ces équipements assurent une flexibilité accrue de la puissance développée sur le réseau.

Ces deux technologies se distinguent par la durée de stockage. Le thermocline est en général une cuve de quelques milliers de m^3 pour un stockage journalier tandis que le réservoir permet une capacité plus importante ($< 50\,000\text{ m}^3$), adaptée à un stockage inter-saisonnier et requiert ainsi un espace suffisant pour une telle installation.

Un stockage inter-saisonnier nécessiterait un volume trop important ($1\,000\,000\text{ m}^3$) avec un niveau de température maximal peu adapté (90°C max) compte-tenu de la loi d'eau au départ du réseau (180°C).

Une étude CFERM de 2019 avait montré qu'une cuve de stockage basse pression de volume $1\,840\text{ m}^3$ permettrait à la RIVED de valoriser presque 7 000 MWh/an de chaleur supplémentaire, soit **2 770 t/an** de déchets incinérés.

Pour le SICUCV, cela représenterait un effacement de la chaleur CPCU de **2 180 MWh**. Néanmoins, cette installation impliquerait le passage en régime basse température / basse pression du réseau de la SEMMARIS et du SICUCV, car les cuves haute pression ne sont pas disponibles pour des grands volumes (sauf à en installer plusieurs de petit volume).

Une telle installation, première en France de cette capacité (cuve de $1\,000\text{ m}^3$ de 20 m de haut stockant de l'eau à 98°C) et baptisée « miroir des énergies », est installée sur le réseau de chaleur de Brest depuis 2017.



« Miroir des énergies » à Brest (source : Ouest France)

Le stockage à haute pression / haute température est possible, pour des cuves d'un volume maximal unitaire de 250 m³ environ. Pour stocker davantage, il est nécessaire multiplier le nombre de cuves.

L'emplacement optimal de ces cuves se situe à proximité de l'UVE (sur le terrain de la SEMMARIS) pour maximiser la valorisation de chaleur. La SEMMARIS n'avait pas manifesté sa volonté de développer cette solution.

Un stockage sur le territoire de Vitry est possible, à condition d'avoir un espace suffisant. Une étude de faisabilité, tenant compte des évolutions des sources de chaleur à venir, serait nécessaire pour évaluer la rentabilité de cette solution. Le stockage thermique représente une augmentation du taux d'ENR&R l'ordre de 1 à 5 % en général.

6. FOCUS ZAC SEINE GARE

L'opération d'aménagement de la ZAC Seine Gare située à Vitry-sur-Seine, au nord-est de la ville, au-dessus de la gare des Ardoines, va apporter d'importants développements sur ce secteur avec notamment le déploiement du T-ZEN, entraînant une réfection des voiries existantes et l'aménagement de bureaux et de logements.

Le projet est divisé en 2 secteurs :

■ Secteur Gare :

- ➔ 25 000 m² de logements et bureaux principalement
- ➔ environ 350 équivalents-logements
- ➔ livraison entre 2025 et 2026

■ Secteur Cavell :

- ➔ 122 000 m² de logements principalement
- ➔ environ 1 740 équivalents-logements
- ➔ livraison entre 2027 et 2028 pour la première phase
- ➔ entre 2028 et 2038 pour la 2^{de} phase.

Les études de faisabilité menées par le SICUCV et CFERM ont préconisé la création de deux réseaux de chaleur autonomes (un par secteur), avec les moyens de production suivants :

■ Secteur Gare :

- ➔ 300 kW chauffage bois pour assurer les besoins en base ;
- ➔ 800 kW chauffage gaz pour assurer les besoins en appoint/secours ;
- ➔ Taux ENR prévisionnel de 80 %.

■ Secteur Cavell :

- ➔ 650 kW PAC géothermale
- ➔ 600 kW chaufferie bois
- ➔ 4 350 kW échangeur CPCU
- ➔ Taux ENR prévisionnel de 76 %

Sur le secteur Gare, la flambée des prix du gaz ainsi que l'augmentation du prix des combustibles bois et les difficultés d'exploitation (peu d'espace disponible pour le stockage) conduisent le SICUCV à remettre en question les modes de production envisagés.

La consommation de bois et de gaz pourraient être revues à la baisse grâce à des systèmes tels que :

- la géothermie sur sondes avec PAC ;
- les PAC avec captage en Seine ou sur eaux usées ;
- la récupération de chaleur sur un data-center ;
- le solaire thermique.

Ces modes de production permettent d'assurer une production continue de base, qui pourrait être suffisante lorsque les besoins de chaleur sont faibles, et permettrait notamment de ne pas utiliser la biomasse ni le gaz en été et mi-saison.

Le stockage thermique pourrait également permettre d'optimiser l'utilisation de la chaufferie biomasse.

Néanmoins, les coûts d'investissements et les prix de l'électricité peuvent menacer la viabilité de ces solutions. Ces différents scénarios seront analysés lors des prochaines phases d'étude.

Le SICUCV souhaite également revoir les hypothèses économiques pour le secteur Gare, notamment pour la PAC géothermique et la liaison CPCU, dans un contexte d'évolution du prix de l'électricité et de la vapeur CPCU.

7. CONCLUSIONS

L'état des lieux des sources de chaleur à proximité a permis d'identifier des solutions pour diversifier le mix énergétique actuel, dans l'optique de maîtriser les coûts de l'énergie et d'améliorer la part d'ENR&R.

Les solutions les plus pertinentes sur le plan technico-économique sont le développement de la **géothermie profonde** et de la **biomasse**. En effet, celles-ci présentent un potentiel énergétique très élevé puisqu'elles peuvent fournir une grande part de la chaleur nécessaire sur le réseau de Choisy-Vitry (environ 15 % pour un doublet géothermique, et environ 60% des besoins pour une chaufferie biomasse de 35 MW), et cela pour un coût moins élevé que la source de chaleur principale actuelle, à savoir le réseau de vapeur parisien. Ces technologies seront donc intégrées à l'étude des scénarios d'évolution du réseau, qui sera présentée par la suite.

D'autres solutions se révèlent intéressantes, mais avec une envergure plus réduite (de l'ordre de 1 à 5 % des besoins): la récupération de chaleur des data-center, et le stockage thermique.
