

TRANS FAIRE



environnement + urbanisme

SAS au capital de 100 000 €

SIRET 438 626 491 00049

3 passage Boutet

94110 Arcueil

Tél : 01 45 36 15 00

Fax : 01 47 40 11 01

contact@trans-faire.net

www.trans-faire.net

EPA SÉNART

ZAC de Villeray

Saint-Pierre-du-Perray (91)

mars 2017



Étude de faisabilité ENR&R

Sommaire

Fiche synthétique du projet	3
Introduction	5
Objet de l'étude	6
Présentation du projet.....	7
Etat des lieux des filières	13
Contexte réglementaire.....	14
Contexte énergétique	17
Filières énergétiques.....	19
Réseaux d'énergie	28
Scénarios retenus	33
Hiérarchisation des filières	34
Présentation des scénarios retenus	38
Comparaison des scénarios.....	41
Méthode	42
Hypothèses	43
Estimation des consommations	46
Estimation des impacts environnementaux	53
Estimation des impacts financiers annuels.....	58
Approche en coût global	62

La mise en page est optimisée pour une impression recto-verso.

Fiche synthétique du projet

Projet d'aménagement

ZAC de Villeray

Localisation

Les terres du diable, 91 280 Saint-Pierre-du-Perray
Essonne (91)

Maîtrise d'ouvrage

Etablissement Public d'Aménagement (EPA) de
l'Opération d'Intérêt National (OIN) de Sénart

Procédures

Zone d'Aménagement Concerté (ZAC)
Stade : Concertation en cours

Superficie de la ZAC

Environ 36,3 hectares

Programmation

Environ 1 270 logements et équipements induits (à définir)



Vue aérienne du secteur (source EPA Sénart, Laurent Descloux, 2015)



Introduction

Objet de l'étude

Contexte réglementaire

Le projet est réalisé selon une procédure de ZAC. L'article L 300-1 du code de l'urbanisme impose que *« toute action ou opération d'aménagement faisant l'objet d'une évaluation environnementale doit faire l'objet d'une étude de faisabilité sur le potentiel de développement en énergies renouvelables de la zone, en particulier sur l'opportunité de la création ou du raccordement à un réseau de chaleur ou de froid ayant recours aux énergies renouvelables et de récupération. »*

L'étude doit réaliser un état de lieux des énergies disponibles sur le site et étudier la faisabilité de leur mise en œuvre pour répondre à la question : « est-il techniquement et économiquement possible de développer les énergies renouvelables dans le cadre de cette opération d'aménagement, et si oui par quel(s) moyen(s) ? ». Nous privilégions pour cela une approche pragmatique adaptée au programme et au stade d'avancement du projet.

Objectifs de l'étude

Les objectifs de ce document sont de :

- Analyser des directives et politiques énergétiques à différentes échelles.
- Présenter les différentes filières énergétiques disponibles sur le site.
- Hiérarchiser les filières énergétiques sur le site pour constituer une aide à la décision en matière d'investissement énergétique.
- Estimer les consommations énergétiques futures de la ZAC.
- Étudier des scénarios d'approvisionnement en énergie intégrant des énergies renouvelables et la pertinence d'un réseau de chaleur.
- Réaliser une approche des coûts et du modèle économique.

Présentation du projet

Localisation et contexte

Le projet s'inscrit dans le cadre général de l'urbanisation de l'OIN de Sénart (anciennement Ville Nouvelle de Sénart).

Le site d'étude se trouve au sud-est du tissu urbanisé de la commune de Saint-Pierre-du-Perray.

Site d'implantation

Le projet s'implante à Saint-Pierre-du-Perray, commune située dans le département de l'Essonne à environ 40 km au sud-est de Paris, sur le territoire de l'Agglomération Grand Paris Sud (GPS) Seine-Essonne-Sénart créée au 1er janvier 2016 et qui regroupe 24 communes dont Saint-Pierre-du-Perray.

Contexte

Saint-Pierre-du-Perray présente aujourd'hui environ 175 ha urbanisés par des logements et 33 ha environ par des activités pour un territoire de 1 172 ha.

La ZAC du Trou Grillon, la ZAC de Villepècle et la ZAC de la Clé de Saint-Pierre sont des ZAC mixtes (logements et activités) qui supportent actuellement l'essentiel du développement urbain de la commune.



Localisation du site d'étude (fond Géoportail, 2014)

La population de la commune, qui était de 5 862 habitants en 1999, était en 2013 de 9 758. Ceci représente une augmentation de plus de 66 % en 14 ans.

Les emplois, estimés à 2 194 en 2013, ont doublés depuis 1999. La partie dédiée aux activités économiques dans la ZAC de Villepècle présente encore quelques terrains ouverts à la commercialisation. La partie activités de la ZAC de la Clé de Saint-Pierre prend le relai avec à terme de l'ordre de 750 à 1 000 emplois.

Les ZAC mentionnées ci-avant ont ainsi permis de développer habitats et emplois de manière significative et soutenue et ont contribué à modifier profondément l'organisation de la commune avec, en particulier, l'émergence d'un nouveau cœur de ville.

Pour accompagner ce développement, plusieurs groupes scolaires ont été réalisés, et un nouveau groupe scolaire est programmé dans le secteur sud de la Clé de Saint-Pierre.

Conception urbaine et paysagère

Aménagement d'un nouveau quartier

Le projet consiste en l'aménagement d'un nouveau quartier à vocation essentiellement résidentielle.

Le développement envisagé s'appuie sur deux axes :

- Une insertion en continuité des urbanisations alentours : le nouveau centre-ville au nord-ouest, le Trou Grillon au nord et à l'ouest, la Clé de Saint-Pierre au nord-est. La continuité concerne en particulier tous les types de déplacement, avec une grande attention portée aux piétons et aux cyclistes, ainsi que le maillage des espaces verts publics.
- Une attention portée au grand paysage, puisque ce nouveau quartier, qui s'ouvre côté est et sud sur des terres agricoles, va constituer la limite de l'urbanisation au sud et à l'est, la route du golf en constituant au sud une délimitation physique.

Ce nouveau quartier s'insère également en continuité du parc intercommunal des sports, pour lequel une aire d'environ 5 ha a été réservée, côté avenue Lachenal, afin d'en permettre l'extension.

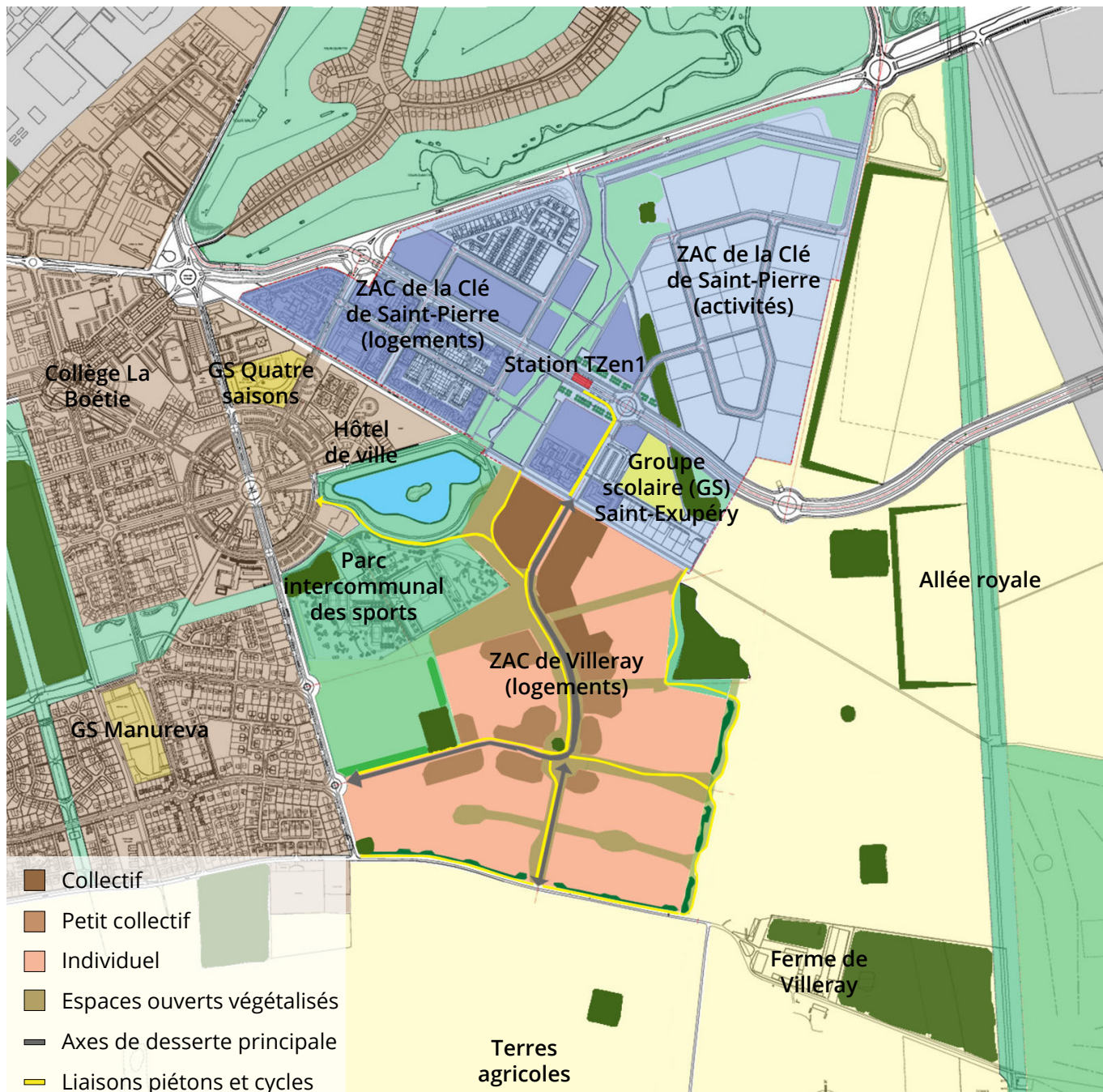


Schéma indicatif de principe d'aménagement (source EPA Sénart, 2017)

Programmation

Le programme porte sur la construction de 1 270 logements avec les objectifs suivants :

- Les constructions se répartissent sensiblement à parité entre habitat individuel et appartements.
- L'habitat individuel représente environ les $\frac{3}{4}$ des surfaces cessibles.
- Les logements sociaux représentent 25 % de la programmation.
- Une large variété est recherchée dans les typologies et les formes bâties.

La ZAC participera financièrement aux besoins d'équipements publics induits par la programmation de logements. Toutefois à ce stade, le programme des équipements publics reste à définir.

En ce qui concerne l'accueil scolaire, les groupes scolaires existants (groupe scolaire Manureva notamment en première phase du projet) et en projet (groupe scolaire Saint-Exupéry dans la ZAC de la Clé de Saint-Pierre) seront mobilisés et en capacité d'accueillir la totalité des enfants de la ZAC. Des aménagements ponctuels pourront être nécessaires mais compte tenu de ce contexte, il n'est pas prévu de nouveau groupe scolaire au sein de la ZAC de Villeray.

Par ailleurs, il n'est pas prévu de commerces dans le quartier, par souci de préserver le tissu commercial de centre ville.

Dans cette logique, les liaisons de la ZAC avec l'urbanisation existante et le centre ville ont pour objectif de favoriser les échanges en confortant ce tissu par l'apport d'une nouvelle population.

Phasage

Le développement de la ZAC est prévu sur une douzaine d'années avec une fin des livraisons de logements envisagée en 2032.

Les premières constructions sont prévues en partie sud-ouest de la ZAC, au contact de l'urbanisation existante du Trou Grillon.

La réalisation de cette première phase est envisagée à l'horizon 2023 avec la livraison d'environ 220 logements individuels. Cette programmation vise la recherche d'un équilibre avec l'offre proposée sur la Clé de Saint-Pierre (logements collectifs majoritairement).

Dans la seconde phase de l'opération, un équilibre annuel de livraison sera recherché entre logements collectifs et individuels.

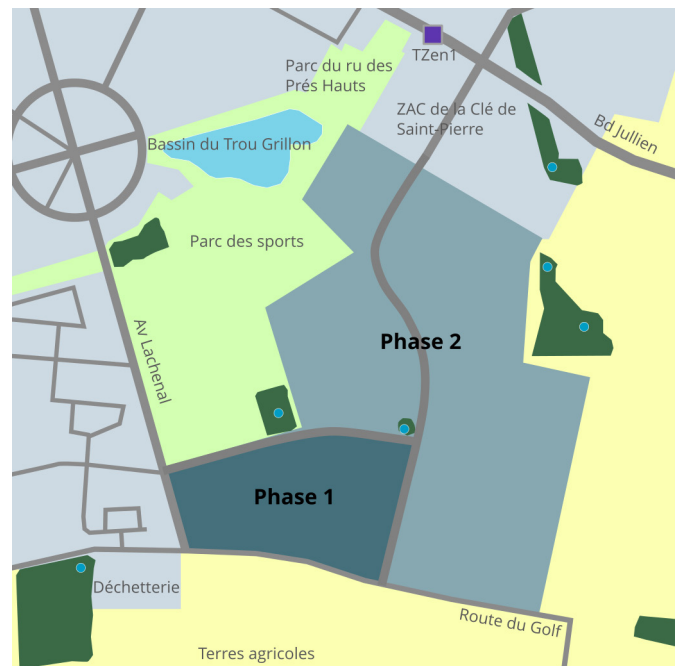


Schéma indicatif du phasage



Etat des lieux des filières

Contexte réglementaire

Contexte

Les différentes réglementations ou cadres volontaires auxquels le site est soumis, suivant la thématique des énergies renouvelables et réseaux de chaleur, sont, du plus global au plus local, :

- Le Plan Climat Énergie Européen fixant des objectifs pour la France à l'horizon 2020.
- Les Grenelles de l'Environnement (I et II).
- La loi relative à la transition énergétique.
- Les réglementations thermiques RT2012 et RT Existant.
- Le Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Énergie (SRCAE) de l'Île-de-France dans sa version définitive du 14 décembre 2012.
- Le Plan de Protection de l'Atmosphère pour l'Île-de-France dans sa version « révision approuvée » du 25 mars 2013.

Présentation des plans et schémas

Plan Climat Énergie Européen

Le Plan Climat Énergie Européen adopté le 23 janvier 2008 par la Commission Européenne vise un objectif européen dit 3 x 20, consistant à :

- Diminuer de 20 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990.
- Réduire de 20 % la consommation d'énergie primaire par rapport au scénario tendanciel.
- Atteindre 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergies finales en 2020.

La directive 2009/28/CE du parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables fixe la répartition des objectifs à atteindre pour la France à une production de 23 % de sa consommation d'énergie à partir d'énergies renouvelables en 2020, alors qu'elle n'était que de 10 % en 2005.

Cet objectif a été décliné par filières, pour privilégier celles qui sont les plus pertinentes pour la France, grâce à un mécanisme de subventions.

Ces aides doivent notamment donner une impulsion pour développer les filières biogaz, biomasse et géothermie.

Le 22 janvier 2014, la Commission Européenne a annoncé le second « paquet énergie climat » à travers de nouveaux objectifs pour 2030, en particulier la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40 % (par rapport au niveau 1990), et une part de 27 % d'énergie renouvelable dans le mix énergétique européen. Cependant cette annonce pourra se traduire par une baisse des ambitions, ces règles ne s'appliquant plus individuellement (à

chaque État membre) mais collectivement, à l'échelle européenne.

Grenelles de l'Environnement (I et II)

A l'échelle nationale, le Grenelle de l'environnement (I et II) est un programme de rupture technologique sur le bâtiment neuf. Lancé en 2007, il a pour objectif de renforcer la réglementation et de relever progressivement les normes en vue de généraliser les bâtiments à consommation d'énergie nulle ou à énergie positive.

Les échéances voulues par le Grenelle de l'environnement pour le bâtiment sont les suivantes :

- 2012/2013 : généralisation des logements neufs à basse consommation.
- 2020 : objectif de généralisation des logements neufs à énergie passive ou positive pour baisser de 38 % la consommation énergétique des bâtiments existants d'ici 2020 (article 5 de la loi Grenelle I).
- 2050 : facteur 4 – division par quatre des émissions de gaz à effets de serre par rapport à 1990, par l'amélioration des performances des bâtiments et le développement des EnR.

Le Grenelle II vise notamment à accélérer le rythme de rénovation énergétique dans l'ancien, via divers dispositifs : boîte à outils, gouvernance, aides et incitations financières...

Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte a été publiée au journal officiel le 18 août 2015. Elle vise « à permettre à la France de contribuer plus efficacement à la lutte contre le dérèglement climatique et à la préservation de l'environnement, ainsi que de renforcer son indépendance énergétique tout en offrant à ses entreprises et ses citoyens l'accès à l'énergie à un coût compétitif. »¹

¹ MEEM, 2017

La loi fixe des objectifs à moyen et long termes, et notamment,² :

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 (facteur 4).
- Réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012 en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030.
- Réduire la consommation énergétique primaire d'énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à la référence 2012.
- Porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de la consommation finale brute d'énergie en 2030.
- Porter la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % à l'horizon 2025.
- Atteindre un niveau de performance énergétique conforme aux normes « bâtiment basse consommation » pour l'ensemble du parc de logements à 2050.

A l'horizon 2018, la loi de transition énergétique pour la croissance verte devrait permettre la mise en place d'un standard environnemental ambitieux pour les bâtiments neufs.

Réglementation Thermique RT

L'arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions et l'arrêté du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments autres que ceux concernés par l'arrêté précédant fixent les valeurs maximales de consommation Cepmax par m²SRT³/an par type de locaux.

Le respect de la RT2012 implique que la consommation en énergie primaire (chauffage, eau chaude sanitaire, auxiliaires de ventilation, éclairage, refroidissement) soit inférieure à un seuil exprimé en valeur absolue et modulable en fonction de la localisation, des caractéristiques et de l'usage des bâtiments.

² MEEM, 2017

³ Surface de plancher au sens de la RT

Label E+ C-

Afin de préparer la future réglementation environnementale de la construction neuve sur une base partagée et pragmatique, une expérimentation nationale est lancée pour tester en grandeur réelle des niveaux d'ambition nouveaux et les questions de faisabilité.

Le label E+ C- vise à produire des bâtiments à énergie positive et à faible empreinte carbone au travers d'une démarche volontaire.

Le label définit 4 niveaux de performance en matière d'énergie et 2 niveaux pour l'impact carbone d'un bâtiment.

Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Énergie (SRCAE) d'Île-de-France

Le Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Énergie (SRCAE) d'Île-de-France, arrêté en décembre 2012, définit les trois grandes priorités régionales : le renforcement de l'efficacité énergétique des bâtiments avec un objectif de doublement du rythme des réhabilitations dans le tertiaire et de triplement dans le résidentiel, le développement du chauffage urbain alimenté par des énergies renouvelables et de récupération, avec un objectif d'augmentation de 40 % du nombre d'équivalents logements raccordés d'ici 2020, la réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre du trafic routier, combinée à une forte baisse des émissions de polluants atmosphériques (particules fines, dioxyde d'azote).

Le SRCAE fixe 17 objectifs, les suivants pouvant concerner le projet :

- BAT 1 Encourager la sobriété énergétique dans les bâtiments et garantir la pérennité des performances.
- BAT 2 Améliorer l'efficacité énergétique de l'enveloppe des bâtiments et des systèmes énergétiques.
- ENR 2 Favoriser le développement des énergies renouvelables intégrées au bâtiment.
- ELEC 1 Maîtriser les consommations électriques du territoire et les appels de puissance.
- TRA 1 Encourager les alternatives à l'utilisation des modes individuels motorisés.
- TRA 3 Favoriser le choix et l'usage de véhicules adaptés aux besoins et respectueux de l'environnement.

- URBA 1 Promouvoir aux différentes échelles de territoire un développement urbain économe en énergie et respectueux de la qualité de l'air.
- CD 1 Réduire l'empreinte carbone des consommations des franciliens.
- AIR 1 Améliorer la qualité de l'air pour la santé des franciliens.
- ACC 1 Accroître la résilience du territoire francilien aux effets du changement climatique.

Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) d'Île-de-France

Le Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) en vigueur a été approuvé en mars 2013. Sa révision a été initiée en 2016. Il se compose de mesures réglementaires et d'actions incitatives, dans l'objectif d'agir sur tous les secteurs responsables d'émissions polluantes en Île-de-France. Il permet de décliner les objectifs nationaux du Plan Particules adopté en 2009 à la suite des lois Grenelle et certaines orientations du SRCAE d'Île-de-France. La mesure réglementaire 9 « définir les attendus relatifs à la qualité de l'air à retrouver dans les études d'impact » concerne le projet.

Absence de Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET)

Le territoire n'est pas soumis à un Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET).

L'Agglomération Grand Paris Sud devrait établir un PCAET à moyen terme.

Contexte énergétique

La consommation énergétique nationale¹

Etat des lieux

Le bâtiment représente près de 45 % de la consommation énergétique nationale et plus 25 % des émissions de gaz à effet de serre.

La consommation d'énergie primaire en France métropolitaine a représenté 256,7 Mtep (méga tonnes équivalent pétrole) en 2015.

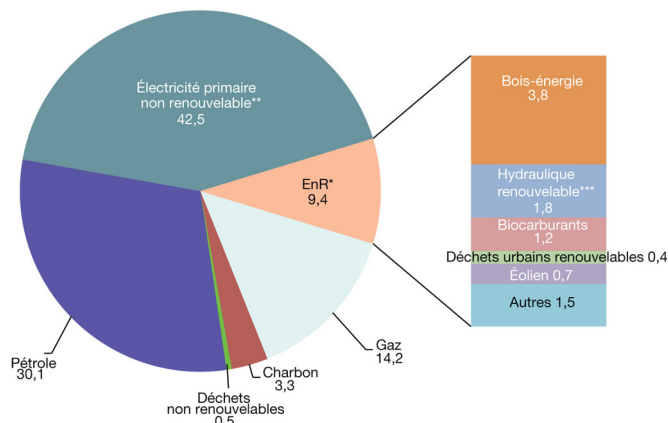
Le bouquet énergétique primaire de la France est assez stable de manière générale depuis le milieu des années 2000. Il se compose en 2015 de 42 % d'électricité primaire non renouvelable (nucléaire pour l'essentiel), de 30 % de pétrole, de 14 % de gaz, de 3 % de charbon et d'un peu moins de 10 % d'énergies renouvelables.

Tendances

On observe une hausse de la consommation primaire² entre 2014 et 2015. Elle est portée en premier lieu par le gaz, qui rebondit de 3 % en 2015 après une chute de 5 % en 2013. La consommation de pétrole est en faible hausse, après une augmentation plus marquée en 2014, tandis que celle de charbon continue à décliner. La consommation d'électricité primaire reste globalement stable, la progression du nucléaire, de l'éolien et du photovoltaïque étant compensée par le recul de l'hydroélectricité. La consommation d'énergies renouvelables thermiques continue à progresser, mais à un rythme moins soutenu que les années précédentes.

Les énergies renouvelables et de récupération

En ajoutant aux filières biomasse, déchets et chaleur primaire renouvelable les filières hydraulique (hors pompages), marémotrice, éolienne et photovoltaïque, et en retirant la partie non renouvelable des déchets incinérés, on obtient le

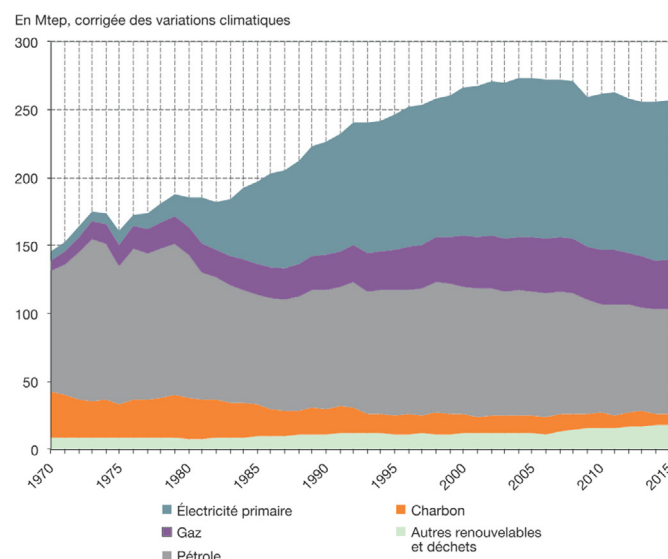


Bouquet énergétique primaire (données corrigées des variations climatiques) (source MEEM, 2016)

* EnR : énergies renouvelables.

** Production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité, et production hydraulique issue des pompages réalisés par l'intermédiaire de stations de transfert d'énergie par pompage (Step).

*** Hydraulique hors pompage.



Evolution de la consommation par type d'énergie (source MEEM, 2016)

1 MEEM, 2016

2 Consommation corrigée des variations climatiques

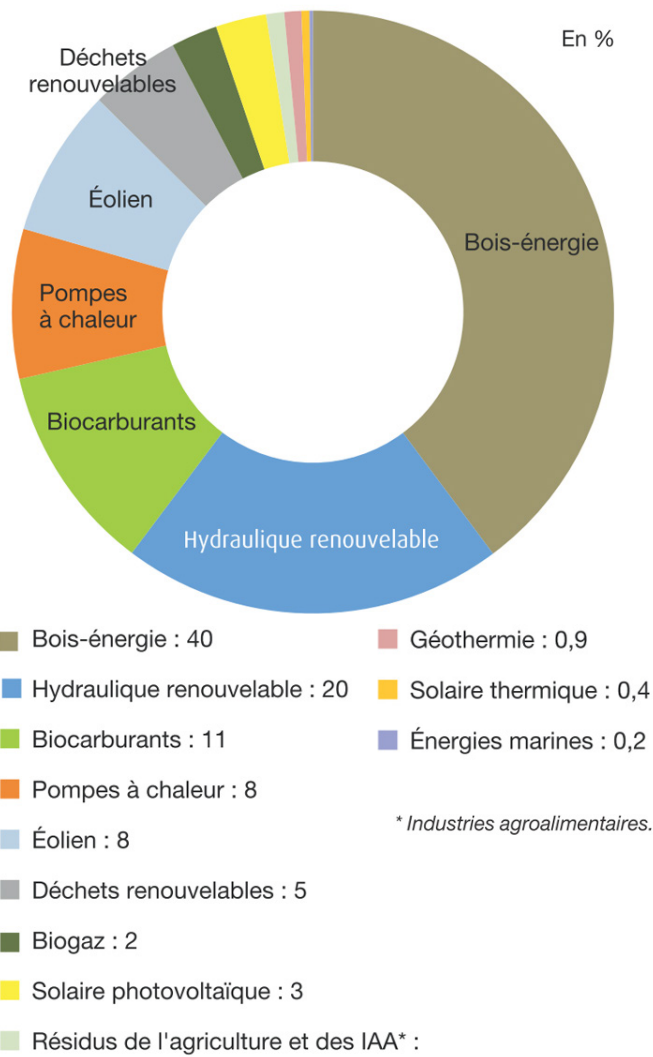
périmètre de l'ensemble des énergies renouvelables et de récupération.

La production primaire d'énergies renouvelables atteint 23,0 Mtep en 2015 contre 22,4 Mtep en 2014 (24,8 Mtep en 2013 et 17,2 Mtep en 2012).

Environ 60 % de la production primaire d'énergies renouvelables est issue de la biomasse : 40 % pour le bois-énergie, 11 % pour les biocarburants, 5 % pour les déchets urbains renouvelables, 2 % pour le biogaz et 1 % pour les résidus de l'agriculture et des industries agroalimentaires.

L'électricité primaire renouvelable, regroupant l'hydraulique renouvelable, les énergies marines, l'éolien et le photovoltaïque représente en 2015 le tiers de la production primaire.

La chaleur primaire d'origine aérothermique, géothermique ou solaire représente 9 % de la production primaire d'énergies renouvelables.



Production primaire d'énergies renouvelables en 2015 (source MEEM, 2016)

Filières énergétiques

Énergies non renouvelables

Gaz

Le gaz représente 14 % de l'énergie consommée en France tous secteurs confondus.¹

L'origine du gaz naturel importé en France est variée : Norvège, Pays-Bas, Russie, Algérie, Nigeria, Qatar...

Le gaz naturel est l'énergie d'origine fossile la moins émettrice de CO₂ et de ce fait, il a un impact environnemental de niveau intermédiaire entre les sources d'énergies renouvelables et les ressources fossiles du type fioul ou charbon.

Aucun stockage de la ressource n'est nécessaire. L'alimentation est assurée en flux constant, mais avec une dépendance vis-à-vis du fournisseur.

Disponibilité

Le site d'étude peut être desservi par le réseau de gaz, qui chemine à l'ouest de la ZAC (avenue Lachenal) et au nord (ZAC de la Clé de Saint-Pierre).

Cette solution peut être mise en œuvre à l'échelle d'un logement ou d'un bâtiment.

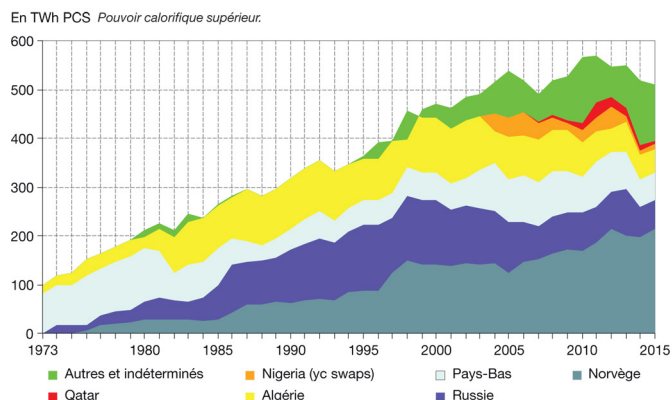
Electricité

L'électricité non renouvelable représente 42 % de l'énergie consommée en France tous secteurs confondus.

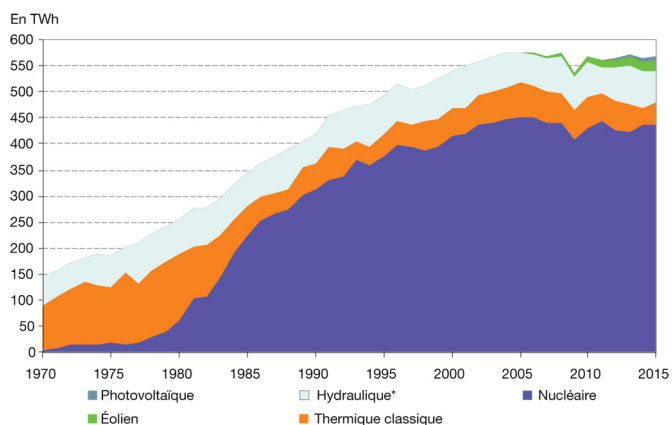
La production brute d'électricité du réseau français (ErDF) provient à 77 % de centrales nucléaires en 2015.

L'électricité d'origine hydraulique (y compris énergie marémotrice) représente 10,7 % de la production

¹ MEEM, 2016



Evolution des importations de gaz naturel en quantités selon le pays d'origine (source MEEM, 2016)



Production brute d'électricité (source MEEM, 2016)

française, le thermique classique (centrales à charbon et à gaz) 7,3 %, l'éolien 3,7 % et le photovoltaïque 1,3 %.²

Disponibilité

Le site d'étude peut être desservi par les réseaux d'électricité, qui cheminent à l'ouest de la ZAC (avenue Lachenal) et au nord (ZAC de la Clé de Saint-Pierre).

² MEEM, 2016

Énergies renouvelables locales

Énergie solaire

L'énergie solaire est mobilisable pour la production d'eau chaude sanitaire, de chauffage ou d'électricité.

A saint-Pierre-du-Perray, le gisement solaire annuel est compris entre 1 200 et 1 400 kWh/m² pour des panneaux installés en toiture (selon leur inclinaison) et est de l'ordre de 950 kWh/m² pour des panneaux verticaux (façade). Le gisement disponible est plus de 7 fois plus important au mois de juin qu'au mois de décembre.

Panneaux solaires thermiques

Les panneaux solaires thermiques permettent la production d'eau chaude grâce à un liquide caloporteur qui circule dans le panneau et absorbe le rayonnement électromagnétique émis par le soleil.

L'eau chaude produite peut être utilisée pour l'eau chaude sanitaire (ECS solaire) ou pour le chauffage (plancher solaire direct).

Il existe 3 grandes catégories de panneaux solaires thermiques :

- Les panneaux plans vitrés sont les plus courants. Le fluide caloporteur circule dans un serpentin

placé entre la vitre extérieure et une couche réfléchissante.

- Dans les panneaux tubes, le serpentin est placé au centre d'un tube de verre. Ils sont principalement utilisés pour rattraper un angle d'orientation ou d'inclinaison (par rapport à l'horizontale), car même s'ils ont un meilleur rendement le sur-investissement ne se justifie pas autrement.
- Les capteurs non vitrés, de type « moquette solaire » sont utilisés lorsque de grande surface de toiture sont disponibles. En effet leur rendement est nettement inférieur aux panneaux vitrés, mais ils disposent d'un très bon rapport qualité/prix.

Pour les logements, il est recommandé de réserver des surfaces de toiture au solaire thermique plutôt qu'au solaire photovoltaïque puisque les performances actuelles des panneaux thermiques sont supérieures (450 kWh/m²/an contre 100 kWh/m²/an pour le photovoltaïque).

Panneaux solaires photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

Mois	Irradiation horizontale	Irradiation optimale	Irradiation verticale
Janvier	904 Wh/m ² .jr	1 440 Wh/m ² .jr	1 460 Wh/m ² .jr
Février	1 670 Wh/m ² .jr	2 420 Wh/m ² .jr	2 230 Wh/m ² .jr
Mars	3 200 Wh/m ² .jr	4 130 Wh/m ² .jr	3 310 Wh/m ² .jr
Avril	4 680 Wh/m ² .jr	5 300 Wh/m ² .jr	3 440 Wh/m ² .jr
Mai	5 330 Wh/m ² .jr	5 380 Wh/m ² .jr	2 920 Wh/m ² .jr
Juin	5 940 Wh/m ² .jr	5 700 Wh/m ² .jr	2 820 Wh/m ² .jr
Juillet	5 790 Wh/m ² .jr	5 690 Wh/m ² .jr	2 930 Wh/m ² .jr
Août	4 930 Wh/m ² .jr	5 340 Wh/m ² .jr	3 200 Wh/m ² .jr
Septembre	3 800 Wh/m ² .jr	4 750 Wh/m ² .jr	3 560 Wh/m ² .jr
Octobre	2 190 Wh/m ² .jr	3 080 Wh/m ² .jr	2 720 Wh/m ² .jr
Novembre	1 120 Wh/m ² .jr	1 700 Wh/m ² .jr	1 650 Wh/m ² .jr
Décembre	790 Wh/m ² .jr	1 340 Wh/m ² .jr	1 420 Wh/m ² .jr
Année	3 370 Wh/m ² .jr	3 860 Wh/m ² .jr	2 640 Wh/m ² .jr

Irradiation solaire (source PVgis, 2016)

L'électricité produite peut soit être utilisée en auto-consommation (consommation, en journée, sur le lieu de production) soit être réinjectée sur le réseau ERDF.

Le tarif de rachat n'est plus aussi rentable que par les années passées, du fait de la révision des tarifs réglementés. Néanmoins la hausse constante du prix de l'électricité « réseau » rend mécaniquement cette production de plus en plus rentable.

L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium (80 % du marché) reste important. Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer¹. La durée de vie des panneaux est comprise entre 25 et 30 ans.

Disponibilité

L'énergie solaire est valorisable sur le site avec un horizon sud totalement dégagé et une absence globale de masques solaires majeurs.

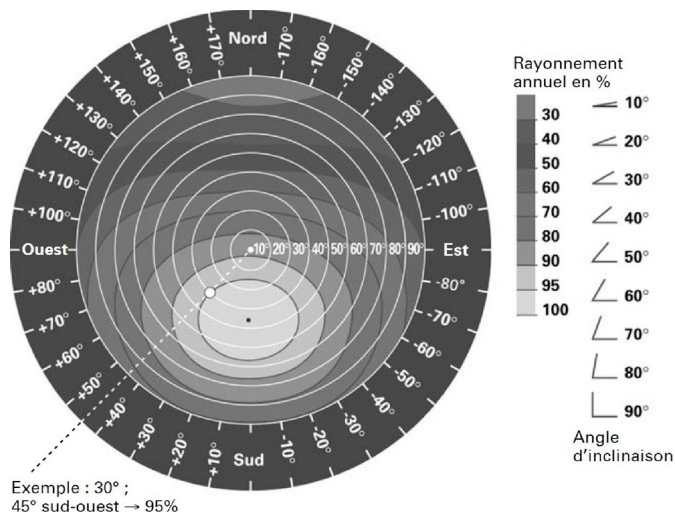
Éolien

Un parc éolien est une installation de production d'électricité par l'exploitation de la force du vent transformée en énergie électrique. Il s'agit d'une production au fil du vent, il n'y a donc pas de stockage d'électricité.

Grand éolien

Le grand éolien représente les éoliennes de hauteur supérieure à 50 m, développant des puissances de 2 à 3 MW, équipées de rotors (la partie constituée du moyeu et des pales) de grandes dimensions. Ces éoliennes constituent la grande majorité de la capacité installée au monde. Les aérogénérateurs sont destinés à la production d'électricité pour le réseau. Leur vitesse de rotation est faible : 30 tours / minute pour une pale d'un diamètre de 20 mètres.

Le gisement éolien est faible sur le site. Par ailleurs, les règles d'implantation sont, a minima, un retrait de 500 m des habitations et un regroupement de 5 éoliennes. Le site n'est pas adapté à cette source d'énergie renouvelable.



Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombre sur les performances (source Viessman)

Micro éolien

Le micro éolien désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances, de 100 watts à 36 kilowatts, et de moins de 12 m de hauteur, raccordées au réseau ou bien autonomes en site isolé.

L'élément essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable est le vent, qui doit être ni trop puissant ni trop faible et fréquent.

La rugosité des sols urbains réduit la vitesse du vent et apporte des turbulences néfastes auxquelles l'éolienne doit s'adapter.

L'Etat de l'Art des Éoliennes en milieu urbain réalisé par l'ARENE IdF, actualisé en 2006, indique que quelle que soit l'éolienne de petite ou moyenne puissance considérée et quelle que soit sa configuration, le coût de revient du kWh produit est largement plus élevé que le coût d'achat ou évité. La rentabilité de ces solutions reste encore à démontrer aujourd'hui.

L'intégration paysagère de ces solutions est également une contrainte à prendre en compte.

Disponibilité

La solution éolienne apparaît mal adaptée au site d'étude, avec un potentiel relativement faible (présence des forêts de Rougeau et de Sénart au sud et au nord du site, dans le couloir des vents dominants d'Île-de-France).

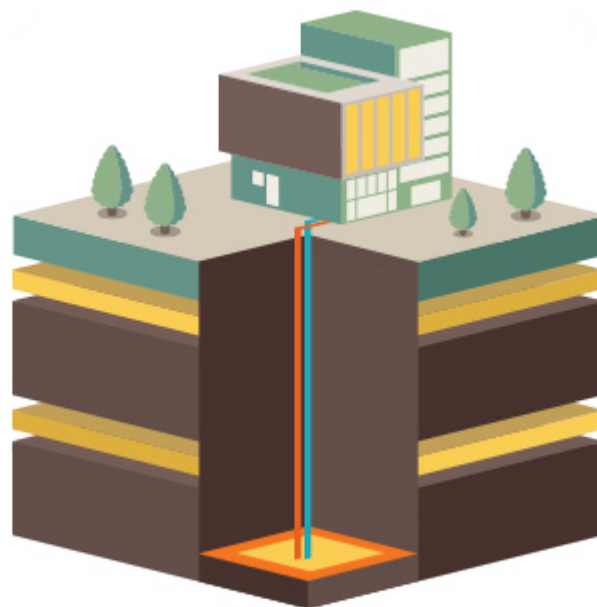
¹ Connaissance des énergies, 2016

Géothermie

La géothermie est l'énergie produite par la chaleur interne de la terre. En France, la température moyenne au niveau du sol est en général de 10 à 14°C. En Île-de-France, la température augmente en moyenne de 3,5°C tous les 100 m (gradient géothermal).

La géothermie est une source d'énergie permanente dont la production ne dépend pas des conditions naturelles ou climatiques contingentes. Elle ne nécessite pas de stockage.

La géothermie peut servir pour le chauffage et pour le rafraîchissement du bâtiment en période estivale. Ce système réversible a l'avantage de recharger la terre, ce qui limite l'affaiblissement thermique du sol sur le long terme, et permet de maintenir les rendements initiaux.



Principe de la géothermie (source ADEME, 2015)

Géothermie « sèche »

La géothermie « sèche » consiste à prélever de la chaleur au sol par le biais d'un fluide adapté qui circule dans l'ouvrage enterré et vient alimenter une pompe à chaleur (PAC).

Le dimensionnement du système géothermique doit être adapté à la capacité de régénération du sol, des cas d'affaiblissement rapide de la température du sous-sol ayant été identifiés par l'ADEME. Les systèmes réversibles évitent cet affaiblissement.

PAC sur sondes géothermiques

Dans ce système, une pompe à chaleur (PAC) est couplée à un champ de sondes intégré dans le sol, servant de source d'énergie. Le système possède un excellent coefficient de performance (COP de l'ordre de 4) grâce à la température constante de la terre sur toute l'année de fonctionnement.

PAC sur corbeilles géothermiques

Les corbeilles géothermiques sont installées à quelques mètres de profondeur (4 au maximum) et doivent être reliées entre elles avant connexion à la PAC. Ce système nécessite une superficie de terrain importante.

PAC sur pieux géothermiques

Dans ce cas, la PAC est couplée à des échangeurs géothermiques insérés dans les pieux de fondation du bâtiment. L'avantage de ce procédé est le faible surcoût engendré puisque ces pieux sont nécessaires

pour la structure même du bâtiment, tout en offrant des performances comparables à une PAC sur sondes géothermiques. La faisabilité de cette technique dépend de la nature du sol au droit des bâtiments mais également des charges reprises par les pieux.

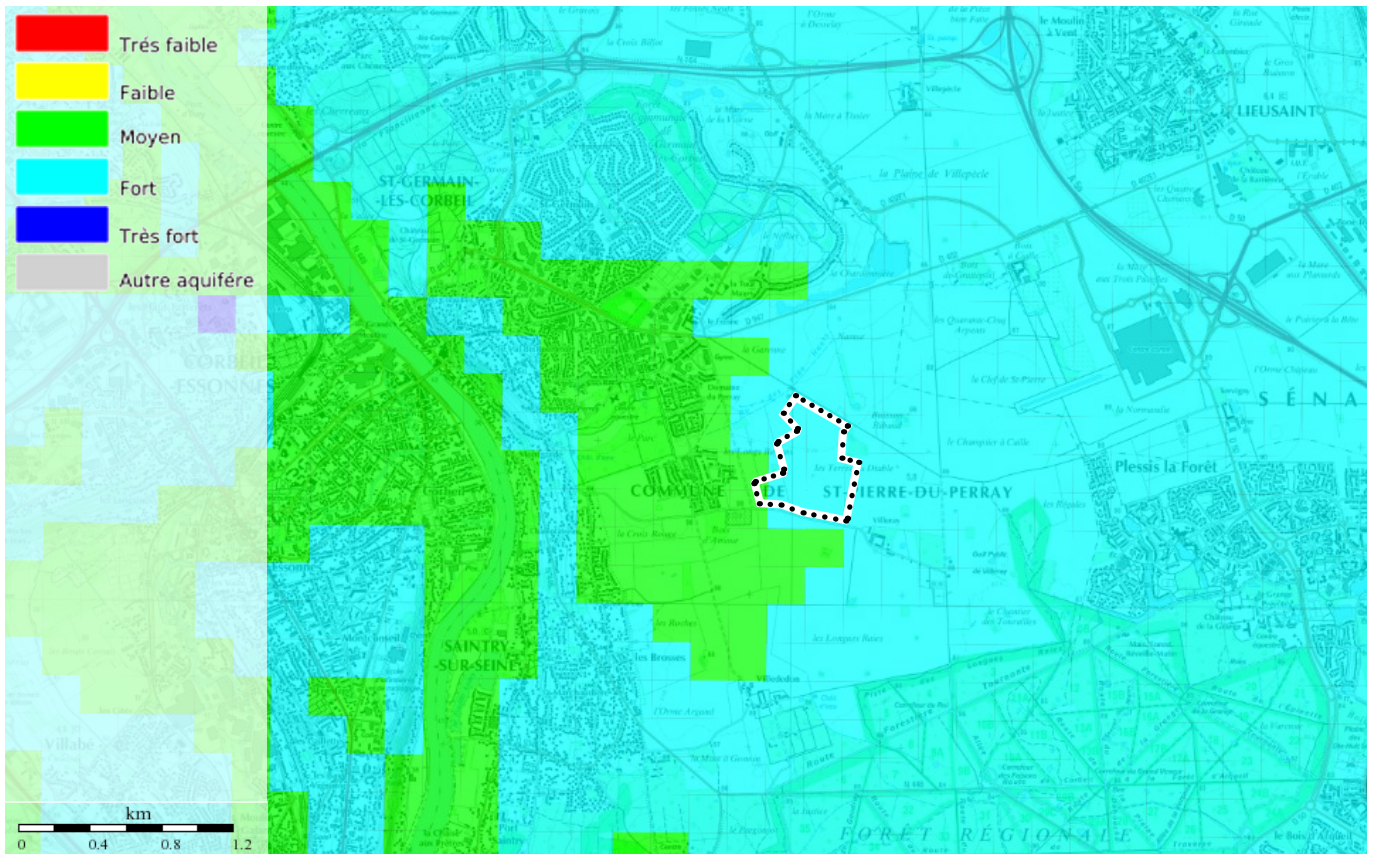
Disponibilité

Les solutions de géothermie « sèche » peuvent être mises en œuvre à l'échelle d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiment et sont adaptées à l'échelle du site.

Géothermie sur nappe

La géothermie sur nappe consiste à prélever de l'eau dans une nappe du sous-sol, utilisée comme source de calories par une PAC eau / eau. Les coefficients de performance (COP) de ces systèmes sont élevés (supérieurs à 4 pour le chauffage, de l'ordre de 3 pour la production d'eau chaude sanitaire).

La réinjection de l'eau puisée est indispensable pour protéger l'environnement et garantir la pérennité de la ressource. Deux puits sont donc nécessaires, un puits de production et un puits de réinjection, ce qui impose la création de 2 forages. Afin de ne pas interférer, les puits de production et de réinjection doivent se trouver à une certaine distance l'un de l'autre. Cette distance doit être déterminée par un



Potentiel géothermique sur nappe (source BRGM, 2016)

spécialiste (hydrogéologue) en fonction du contexte local : caractéristique de la nappe, perméabilité, sens d'écoulement...

Géothermie sur nappe superficielle

L'utilisation d'une nappe de faible profondeur (moins de 200 m) permet l'utilisation d'une eau à température constante de l'ordre de 11-12°C.

L'incidence environnementale d'une géothermie sur nappe superficielle est moindre que sur nappe profonde car les écarts de température entre l'eau prélevée et l'eau rejetée sont faibles.

Le potentiel géothermique sur nappe superficielle est moyen à fort sur le site d'après la cartographie du BRGM :

- Nappe de l'Éocène supérieur :
 - Potentiel moyen.
 - Profondeur 41–50 m.
 - Débit 10–50 m³/h.
 - Épaisseur 10–25 m.

- Transmissivité : 0,001 à 0,01 m²/s.
- Moyennement minéralisée.
- Nappe de l'Éocène moyen et inférieur :
 - Potentiel fort.
 - Profondeur 41–50 m.
 - Débit 50–100 m³/h.
 - Épaisseur 75–150 m.
 - Transmissivité 0,001 à 0,01 m²/s.
 - Moyennement minéralisée.

Disponibilité

Une solution de géothermie sur nappe superficielle peut être mise en œuvre à l'échelle d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiment et est adaptée à l'échelle du site.

Géothermie sur nappe profonde

La géothermie sur forage profond permet d'obtenir des sources d'eau à des températures plus élevées. Plus les nappes sont profondes, plus la température est élevée, mais le coût d'investissement également.

Les nappes mobilisables sont celles de l'Albien (vers 600 m de profondeur - 25°C à 30°C) et du Dogger (1 600 à 1 800 m de profondeur - 55° à 80°C).

Toutefois l'exploitation de ce type de géothermie nécessite une densité thermique importante voire très importante. Par exemple, pour le Dogger, les éléments disponibles placent le seuil de rentabilité à environ 10 000 logements neufs.

Disponibilité

La densité thermique envisagée sur le site d'étude n'est pas compatible avec une solution de géothermie sur nappe profonde.

Bois énergie

Il s'agit de l'utilisation du bois en tant que combustible. Sous réserve d'exploitation durable des forêts, le bois est un matériau 100 % renouvelable.

La combustion du bois comme source d'énergie a un bilan carbone neutre du point de vue des émissions atmosphériques, dans la mesure où le bois est exploité comme une énergie renouvelable. Ainsi la quantité de CO₂ libérée par la combustion du bois est compensée par la capture d'une même quantité de CO₂ pour la croissance de l'arbre. Ceci est vrai tant que l'exploitation du bois conduit à une quantité de bois produite au moins équivalente à celle consommée.

Le bois énergie est principalement disponible sous quatre formes :

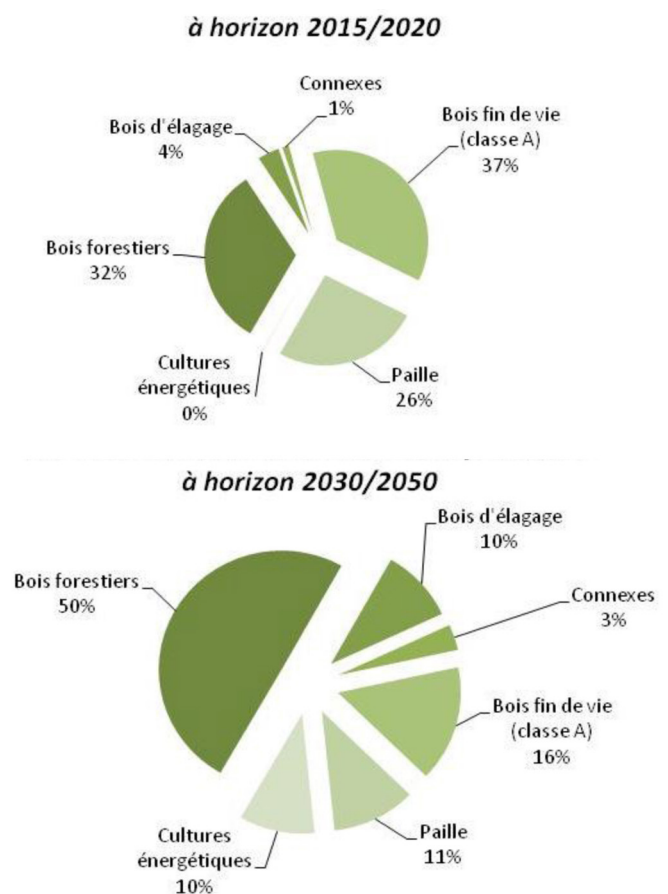
- Les bûches.
- Les granulés de bois ou pellets.
- Les briques de bois reconstituées.
- Les plaquettes forestières.

Ressources

D'après l'étude « Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035 »¹, les capacités de la forêt française permettent une augmentation importante de la récolte à l'horizon 2035, jusqu'à 20 millions de m³ supplémentaires par an, tout en restant dans le cadre d'une gestion durable et réaliste des forêts.

La consommation du bois énergie représente environ la moitié de l'ensemble du bois récolté. Le chauffage des logements est la principale source de consommation de bois (7,4 millions de ménages français). Le chauffage au bois de ces ménages se fait majoritairement dans un insert ou un foyer fermé, de moins en moins dans un foyer ouvert et de plus en plus dans un poêle à bois. L'auto-provisionnement représente encore 46 % des volumes consommés, bien que cette quantité reste encore très difficile à estimer.

1 ADEME, IGN et FCBA, 2015



Ressources biomasse disponibles en IDF (source ADEME, Région IDF, 2012)

En Île-de-France, la ressource en biomasse énergie s'élève à l'horizon 2015-2020 à 266 ktep/an (kilo tonne équivalent pétrole), constituée majoritairement de bois forestiers, de bois de fin de vie et de paille². À titre de comparaison, en 2013, 29 ktep de biomasse ont été consommées.

Contraintes

Les principales contraintes liées au bois énergie sont :

- Surface et infrastructure nécessaires pour le stockage du combustible (à dimensionner selon la taille de l'installation, collective ou individuelle, et le type de combustible).
- Livraison du combustible régulière (sacs, palettes, vrac...) par route.
- Filtration et dépoussiérage des fumées conformément à la réglementation et aux politiques locales (PPA IDF notamment).
- Suivi en continu des émissions pour les installations importantes.

Pour les générations de chaleur individuelles à partir de biomasse, une réglementation sur les émissions de polluants est également à respecter.

Disponibilité

Le bois énergie est mobilisable pour le projet, à une échelle collective ou individuelle.

Énergie hydroélectrique

L'énergie d'un cours d'eau peut être valorisée en présence d'une chute d'eau (7 m minimum) par l'emploi d'une turbine hydraulique.

Disponibilité

Aucune ressource adéquate n'est identifiée à proximité du site.

2 SRCAE

		PARIS	ZONE SENSIBLE (hors Paris) (1)	HORS ZONE SENSIBLE
FOYERS OUVERTS	→ chauffage principal →	interdit	interdit	interdit
	→ chauffage d'appoint ou agrément →	autorisé	autorisé	autorisé
EQUIPEMENTS EXISTANTS A FOYER FERME	→ chauffage principal →	autorisé si poussières ≤ 16 mg/m ³ (2)	autorisé	autorisé
	→ chauffage d'appoint ou agrément →	autorisé si rendement ≥ 65%	autorisé	autorisé
EQUIPEMENTS NEUFS A FOYER FERME	→ chauffage principal →	autorisé si poussières ≤ 16 mg/m ³ (2)	autorisé si Flamme Verte 5 ★ (3)	autorisé
	→ chauffage d'appoint ou agrément →	autorisé si Flamme Verte 5 ★ (3)	autorisé si Flamme Verte 5 ★ (3)	autorisé

(1) la liste des communes de la zone sensible est disponible à l'adresse : http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Communes_ZS_cle6259e4.pdf

(2) mesure à 13% d'oxygène

(3) ou rendement ≥ 70% et taux de CO ≤ 0,12% (à 13% d'oxygène)

Réglementation applicable à la combustion individuelle du bois en IDF (source DRIEE IDF, 2015)

Énergies de récupération

L'énergie fatale est la quantité d'énergie intrinsèquement contenue dans les matériaux ou processus. Cette énergie potentielle se perd définitivement si elle n'est pas récupérée.

Incinération d'ordures ménagères

Avec près de 130 usines réparties sur tout son territoire, la France possède le plus grand parc d'incinérateurs d'ordures ménagères d'Europe. La valorisation énergétique issue de l'incinération des déchets constitue un important gisement d'énergie de récupération.

Disponibilité

Il n'existe pas actuellement d'unités de traitement à proximité du site¹. Cette filière n'est pas disponible pour le site d'étude.

Méthanisation

La méthanisation permet de traiter des rejets aussi divers que les boues de stations d'épuration, les déjections animales, les déchets agricoles ou de l'industrie agro-alimentaire, les ordures ménagères pour la production de biogaz.

Les contraintes d'implantation sont importantes (distance entre les digesteurs et les habitations occupées par des tiers supérieure ou égale à 50 mètres en particulier). La filière se heurte également à la rentabilité de petites unités de proximité dans un contexte urbain où le prix du foncier est important.

Disponibilité

Il n'existe a priori pas de potentiel suffisant à proximité pour la production de biogaz par méthanisation.

Récupération de chaleur sur les eaux usées

Réseaux d'assainissement

Les canalisations d'assainissement véhiculent, dans les zones urbaines et péri-urbaines, des eaux dont la température se situe entre 12 et 20°C tout au long de l'année. Cette ressource en énergie est disponible, continue et peut être utilisée pour le chauffage et le rafraîchissement de bâtiments via un échangeur de chaleur couplé à une pompe à chaleur. En été, la pompe à chaleur est réversible et peut produire du froid pour la climatisation ou le rafraîchissement des locaux, en évacuant la chaleur du condenseur dans les eaux usées.

La performance du système dépend principalement du débit des eaux usées (au minimum 12 l/s), de la pente du réseau d'assainissement et de la demande en chaleur à proximité. La longueur de l'échangeur doit être comprise entre 20 et 200 mètres linéaires maximum. La puissance de production minimum doit être de 150 kW. La distance entre le réseau et le bâtiment doit être inférieure à 300 m.

Disponibilité

Le potentiel thermique disponible à terme sur le site d'étude apparaît a priori insuffisant pour la mise en œuvre d'un tel système, bien adapté à un quartier de logements collectifs dense.

Eaux grises

Système avec PAC

Le système est principalement composé d'une cuve d'échange thermique et d'une pompe à chaleur eau / eau.

Les eaux usées grises (eaux issues des douches) sont recueillies à une température moyenne de 29°C, et traversent une cuve où sont immergés des échangeurs de chaleur. Ce sont ces échangeurs, dans lesquels circule un fluide caloporteur, qui vont alimenter en calories la pompe à chaleur du système qui produit de l'eau chaude sanitaire.

Les eaux usées grises traitées sont ensuite rejetées à une température moyenne de 9°C dans le réseau d'assainissement.

¹ France Incinération, 2016

Le système (compresseurs, circulateurs, armoire d'automatisme et de régulation, compteurs, nettoyage automatique...) a un Coefficient de Performance (COP) supérieur à 4. Il peut fournir 100 % des besoins en eau chaude d'un bâtiment.

Système sans PAC

Il existe des systèmes plus simples mais moins performants de récupération de chaleur directe. Ces systèmes ont l'avantage de ne pas nécessiter de surface de locaux techniques.

Le principe est l'insertion dans la continuité du tuyau d'évacuation des eaux grises du système qui transfère les calories des eaux grises à l'eau froide en arrivée du chauffe-eau et du mitigeur de la douche.

Le système peut mener à une économie de l'ordre de 40 à 50 % de la production d'eau chaude sanitaire.

Disponibilité

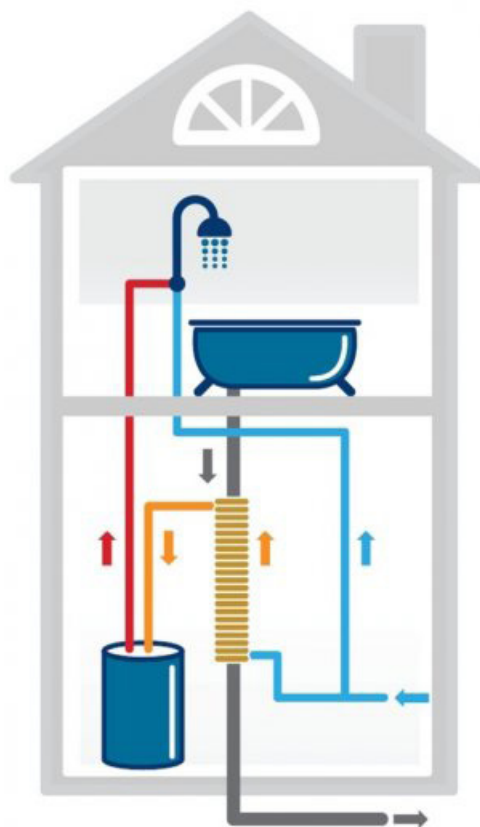
Ces systèmes, avec ou sans PAC, sont mobilisables à l'échelle des bâtiments du projet.

Data center

Les centres de données (data center), constitués d'équipements informatiques puissants, consomment une grosse quantité d'énergie électrique, notamment pour être en permanence rafraîchis par des groupes de production de froid. La chaleur dégagée par les groupes froids, évacuée sous forme d'air chaud, peut être récupérée par des échangeurs thermiques et produire de l'eau chaude.

Disponibilité

Il n'y a pas de data center sur la commune ni à proximité du site d'étude. Cette source de chaleur ne peut donc être utilisée².



Principe de récupération de chaleur sur les eaux grises (source Ecohabitation)

² Data center map, 2016

Réseaux d'énergie

Réseaux d'électricité et de gaz

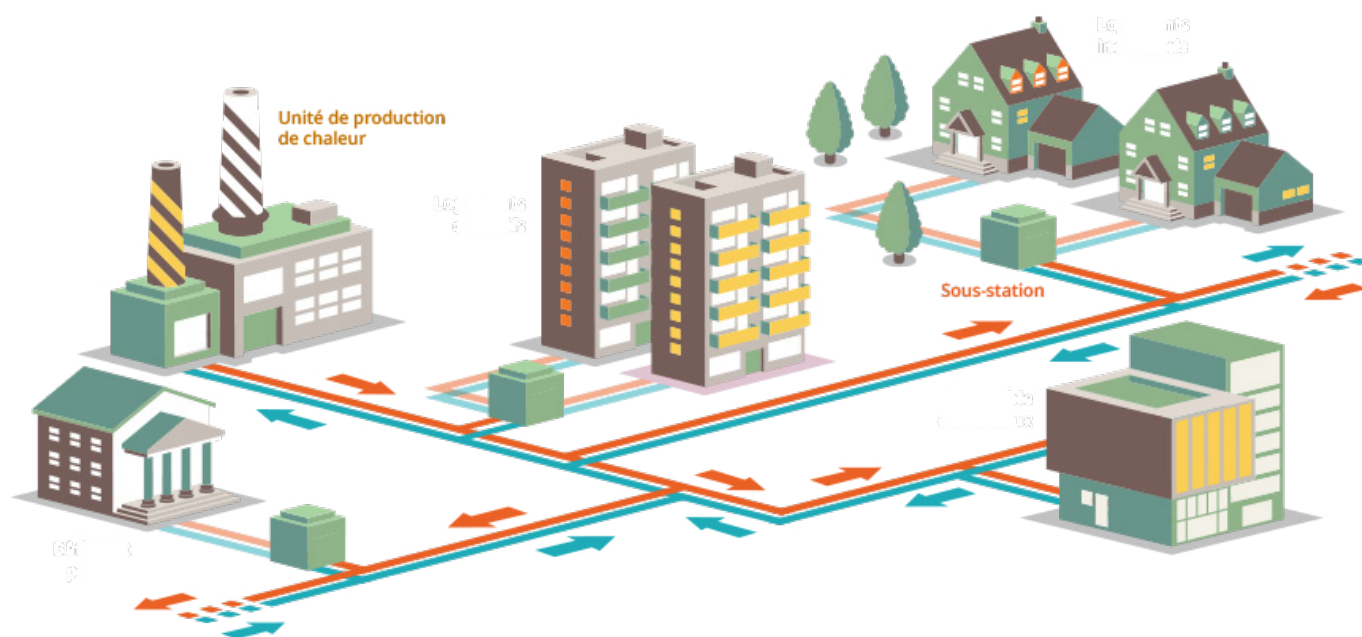
Le site d'étude n'est pas équipé mais des réseaux se trouvent en limite nord (secteur sud de la ZAC de la Clé de Saint-Pierre) et en limite ouest (av Lachenal) sur lesquels la future ZAC de Villeray pourra se raccorder.

Réseaux de chaleur urbain

Présentation générale

Le réseau de chaleur est un système de chauffage à l'échelle urbaine où la chaleur est distribuée à plusieurs bâtiments (eau ou vapeur) par un réseau dédié. Les avantages des réseaux de chaleur sont multiples :

- Pour les collectivités : réduction des GES et polluants émis par les chaudières de chaque bâtiment.
- Pour les propriétaires et gestionnaires de parcs de bâtiments : optimisation à moindre coût de leurs stratégies globales d'investissements pour les réhabilitations en vue de l'atteinte du facteur 4.
- Pour les consommateurs : intérêt économique en particulier lorsque le réseau met en œuvre des EnR&R (moins de sensibilité des tarifs aux variations des prix des énergies fossiles, TVA à taux réduit).

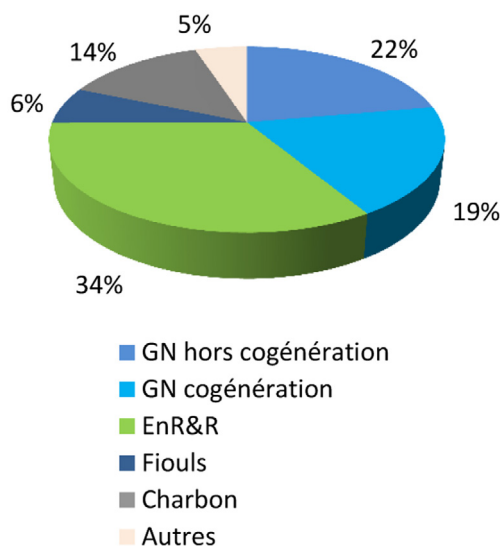


Principe du réseau de chaleur (source ADEME, 2015)

Un réseau de chaleur peut combiner différentes sources d'énergies renouvelables avec des combustibles fossiles. Il est recommandé d'inciter au raccordement des bâtiments aux réseaux de chaleur à la condition expresse que ces réseaux s'engagent à avoir recours aux EnR&R.

Les réseaux de chaleur peuvent également assurer la production d'électricité. Il s'agit alors de cogénération qui réalise une production combinée d'énergie électrique et thermique par la combustion de biogaz, bois énergie ou d'énergies fossiles.

L'intérêt d'une telle installation réside dans son rendement total (somme du rendement électrique et du rendement thermique) qui s'échelonne entre 70 et 90 %. Rappelons que la production simple d'électricité à partir d'une énergie fossile se fait avec des rendements en moyenne de 37 % (une centrale classique) à 55 % (centrale à cycle combiné).



Bouquet énergétique des réseaux de chaleur en IDF (source Fedene, SNCU, 2015)

Contexte national¹

Les réseaux de chaleur français ont représenté en 2014 une consommation de 2,7 Mtep d'énergie.

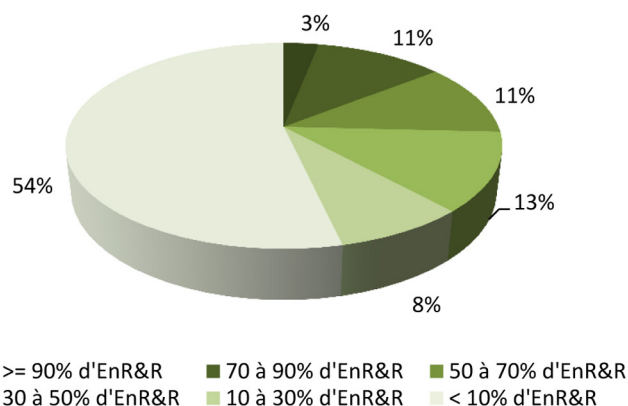
30 % de la consommation primaire des réseaux provient d'énergies renouvelables (contre 24 % en 2013), alors que 44 % de l'énergie employée est du gaz (contre 50 % en 2013).

Contexte régional²

Sur la Région, 106 réseaux de chaleur et de froid ont été recensés en 2013, alimentés par 240 installations de production. Ces installations ont livré un total d'environ 13 600 GWh d'énergie thermique finale.

Les réseaux de chaleur et de froid en Île-de-France sont alimentés à 41 % par du gaz naturel (avec et sans cogénération) et à 34 % par des ENR&R.

La part des ENR&R dans les réseaux reste encore faible, 54 % des réseaux comprenant moins de 10 % d'ENR&R dans leur mix énergétique et seulement 24 % en comprenant plus de 50 %).



Part des ENR&R dans les réseaux de chaleur en IDF (source Fedene, SNCU, 2015)

1 CGDD, 2015

2 Fedene, SNCU, 2014

Pertinence

La pertinence d'un réseau de chaleur dépend de la densité thermique du territoire, c'est à dire la quantité d'énergie de chauffage appelée par mètre linéaire de conduite du réseau de chaleur installée. En effet, les pertes réseau ne sont pas négligeables : actuellement de 5 à 10 %.

Les réseaux actuels ont une densité énergétique très variable, s'échelonnant de 2 MWh/ml à 18 MWh/ml. La valeur moyenne francilienne est légèrement inférieure à 9 MWh/ml.

Dans un premier temps, et bien que le seuil pour l'attribution des aides au Fonds chaleur soit de 1,5 MWh/ml (en mai 2015), seules les zones présentant une densité énergétique supérieure ou égale à 9 MWh/ml ont été retenues pour évaluer des potentiels minimums dans le SRCAE, afin de ne pas dégrader l'équilibre économique moyen des réseaux franciliens.

Potentiel sur le site

Il n'existe pas de réseaux de chaleur urbain sur la commune ou à proximité du site d'étude.

Le potentiel de développement d'un réseau de chaleur sur le site d'étude est estimé faible par la DRIEE IDF.



Potentiel de développement de réseau de chaleur (source DRIEE IDF, 2011)



Scénarios retenus

Hiérarchisation des filières

Les filières sont comparées et hiérarchisées ci-dessous afin d'orienter l'étude sur les sources et usages présentant les plus forts enjeux.

Filière	Production	Échelle possible	Retour sur investissement économique moyen	Retour sur investissement environnemental
Gaz naturel	Chauffage Eau chaude sanitaire	Logement Bâtiment Ilot	Référence	Recours à une énergie fossile : non renouvelable et émettrice de CO2 Vigilance à avoir par rapport à l'origine géographique du gaz
Électricité	Chauffage Eau chaude sanitaire Autres usages	Logement Bâtiment	Référence	Émissions importantes de CO2 lors des pics de consommation Déchets nucléaires Vigilance à avoir par rapport à l'origine géographique de l'uranium
Solaire thermique	Eau chaude sanitaire Chauffage Climatisation	Bâtiment	12 à 15 ans	Amélioration du bilan carbone Utilisation d'une ressource locale sans approvisionnements par la route
Solaire photovoltaïque	Électricité	Bâtiment	15 à 20 ans	Amélioration du bilan carbone Réduction de la production de déchets nucléaires Vigilance à avoir par rapport à l'origine géographique des matériaux / analyse de cycle de vie
Grand éolien	Électricité	ZAC	8 à 10 ans	Amélioration du bilan carbone Réduction de la production de déchets nucléaires Incidences paysagères et écologiques possibles
Petit éolien	Électricité	Ilot ZAC	60 à 140 ans	Amélioration du bilan carbone Réduction de la production de déchets nucléaires
PAC sur sondes géothermiques	Chauffage Rafraîchissement	Bâtiment Ilot	7 à 10 ans	Amélioration du bilan carbone Utilisation d'une ressource locale sans approvisionnements par la route
PAC sur pieux géothermiques	Chauffage Rafraîchissement	Bâtiment	Faible coût si la construction nécessite des fondations sur pieux	Amélioration du bilan carbone Utilisation d'une ressource locale sans approvisionnements par la route

Particularités techniques ou administratives	Données environnementales locales	Orientation pour la ZAC
Abonnement nécessaire	Réseau de gaz disponible à proximité de la ZAC	Filière de référence pour le chauffage et l'ECS (scénario A)
Abonnement nécessaire	Réseau électrique disponible à proximité de la ZAC	Filière de référence pour les autres usages (scénario A)
D'autant plus efficace que les besoins en ECS sont constants sur l'année ou supérieurs en période estivale Appoint nécessaire	Baisse des besoins en période estivale du fait des congés	Filière prioritaire faisant l'objet d'un scénario énergétique
Obligation d'achat par EDF jusqu'à 100kWc, sous conditions Intégration au bâti à trouver (toiture terrasse membrane d'étanchéité, brise soleil, vitrage...)	Possibilité d'éviter les phénomènes de masques	Filière prioritaire faisant l'objet d'un scénario énergétique
Obtention d'un permis de construire Nécessité de figurer en ZDE pour obtenir un contrat d'obligation d'achat	Potentiel éolien à grande hauteur faible Proximité de zone urbaine Superficie insuffisante et site hors ZDE	Filière non retenue par manque de surface foncière
Obtention d'un permis de construire Nécessité de figurer en ZDE pour bénéficier d'un achat EDF, ou de négocier avec un partenaire accrédité d'EDF (coût d'achat moins intéressant) si hors ZDE Fonctionnement adéquat à partir de vents de 7 m/s	Rugosité aérodynamique forte à proximité de bâtiments Méconnaissance du niveau de bruit / vibrations induits par des solutions en toiture	Filière en appoint possible dans un but pédagogique sur la ZAC Pas de pertinence économique actuellement
Distance minimale à respecter entre les sondes (régénération du sol nécessaire)		Filière prioritaire faisant l'objet d'un scénario énergétique
Distance minimale à respecter entre les pieux (régénération du sol nécessaire). Faisabilité dépend de la nature du sol.	A étudier plus précisément en fonction de l'étude de sol pour vérifier l'absence localement de vides souterrains	Filière secondaire à favoriser dans l'hypothèse de pieux à réaliser pour le bâti

Filière	Production	Échelle possible	Retour sur investissement économique moyen	Retour sur investissement environnemental
PAC sur nappe superficielle	Chauffage Eau chaude sanitaire Rafraîchissement	Bâtiment Ilot	5 à 16 ans	Amélioration du bilan carbone Utilisation d'une ressource locale sans approvisionnements par la route
PAC sur aquifère profond (Albien, Dogger)	Eau chaude sanitaire Chauffage Rafraîchissement	ZAC	Rentabilité pour besoins supérieurs à 40 GWh/an pour le Dogger	Amélioration du bilan carbone Utilisation d'une ressource locale sans approvisionnements par la route
Bois	Chauffage Eau chaude sanitaire Électricité (cogénération)	Bâtiment Ilot	8 à 15 ans	Amélioration du bilan carbone en cas de recours à une ressource gérée de manière durable Contrainte liée à l'acheminement Possibilité de valorisation de déchets de bois Possibilité de faire de la cogénération : production d'électricité verte sur le site
Incinération d'ordures ménagères	Électricité Chauffage Eau chaude sanitaire	ZAC	Reste à déterminer	Installations classées avec les contraintes écologiques associées
Méthanisation	Électricité Chauffage Eau chaude sanitaire	ZAC	6 à 17 ans	Filière courte pour le traitement de déchets agricoles et déchets verts Équilibrage du cycle du carbone avec les activités agricoles»
Récupération d'énergie sur réseaux d'assainissement	Eau chaude sanitaire Chauffage Climatisation	ZAC	Entre 2 et 10 ans	Amélioration du bilan carbone Utilisation d'une ressource locale sans approvisionnements par la route
Récupération de chaleur sur eaux grises	Eau chaude sanitaire	Logement Bâtiment	Entre 5 et 15 ans	Amélioration du bilan carbone Utilisation d'une ressource locale sans approvisionnements par la route Réduction des rejets d'eaux au réseau d'assainissement
Data center	Chauffage Eau chaude sanitaire	Ilot ZAC	Variable	Amélioration du bilan carbone Utilisation d'une ressource locale sans approvisionnements par la route

Particularités techniques ou administratives	Données environnementales locales	Orientation pour la ZAC
Vérification requise du volume d'eau, du débit exploitable, de la température (réalisation d'un forage de contrôle) Délai administratif long	Potentiel géothermique sur nappe moyen à fort	Filière secondaire (moins pertinente que les sondes pour le projet)
Vérification requise du volume d'eau, du débit exploitable, de la température (réalisation d'un forage de contrôle) Autorisation spécifique pour cette source stratégique d'eau potable	Nappe de l'Albien vers 600m de profondeur Nappe de Dogger vers 1800m de profondeur	Filière non retenue (besoins thermiques insuffisants)
Combinaison avec une installation gaz pour couverture des périodes les plus froides Étude à mener sur la concurrence disponible pour le prix de l'énergie Implantation d'un éventuel silo de stockage hors d'une zone de remontées des nappes	Fournisseurs de plaquettes et granulés bois dans la région	Filière prioritaire faisant l'objet d'un scénario énergétique
Procédure et délais d'études, et d'installation	Pas de modification envisagée du schéma de collecte et de traitement des déchets	Filière non retenue (pas d'installation proche + besoins thermiques insuffisants)
Surface minimale requise de 1 ha (puissance installée de 250 kW à 500 kW) Distance minimale des habitations de 50 m Procédure ICPE Délai d'installation supérieur à 2 ans Nécessité d'une demande en énergie constante.	Insuffisance de place dans la ZAC par rapport au programme Pas de terrains disponibles à proximité de la ZAC Gisement de déchets verts et agroalimentaire à proximité	Filière non retenue (besoins thermiques insuffisants)
Faisabilité dépend du débit et de la pente du réseau, de la présence d'une chute d'eau, des besoins de chaleur à proximité, de la longueur de l'échangeur de 20 à 200 ml max. Puissance de production minimum de 150 kW. Distance entre le réseau et le bâtiment inférieure à 300 ml.	Pas de nuisances car intégré à un réseau enterré Production continue et réversible	Filière non retenue (besoins thermiques insuffisants)
Surface de local technique de l'ordre 20 m ² Techniques disponibles avec et sans PAC		Filière prioritaire faisant l'objet d'un scénario énergétique
Vérification requise des capacités de production de chaleur des data center par un audit énergétique Autorisation spécifique du propriétaire	Pas de nuisances car intégré à un réseau enterré Production continue	Filière non retenue (pas d'installation proche)

Présentation des scénarios retenus

Dans l'ensemble des scénarios, les postes autres que le chauffage et l'ECS sont couverts par l'électricité.

Scénario A : Gaz et ballons thermodynamiques

Chaque opération est chauffée par chaudière au gaz à condensation et bas-NOx (le système de condensation permet d'améliorer le rendement de la combustion), qui assure chauffage et/ou eau chaude sanitaire (ECS).

Ce scénario prend les hypothèses suivantes :

- Logements individuels - Chauffage gaz et production d'ECS par ballon thermodynamique (recours à une énergie renouvelable obligatoire dans la RT2012 / COP¹ de 3).
- Logements collectifs - Chauffage gaz et production d'ECS gaz.

On considère un rendement de la chaudière gaz de 99 % et des pertes liées à la boucle ECS dans les logements collectifs estimées à 20 %.

Scénario B : Gaz et ECS Solaire

Ce scénario est basé sur le scénario A : le projet est alimenté au gaz pour tous les programmes (y compris l'ECS des maisons individuelles).

En complément, les bâtiments sont dotés de panneaux solaires thermiques placés sur leurs toitures. Ces panneaux couvrent 50 % des besoins énergétiques pour la production de l'eau chaude sanitaire (ECS). Cela correspond, pour des panneaux performants, à environ 2 panneaux par logement (4,5 m²).

Afin d'optimiser la production, les panneaux sont préférentiellement orientés au sud. L'inclinaison optimale en Île-de-France est de 36° par rapport à

l'horizontal. La mise en œuvre de panneaux tubes permet de s'affranchir de cette contrainte.

Scénario C : Gaz et production photovoltaïque

Ce scénario est basé sur le scénario A : le projet est alimenté au gaz pour tous les programmes (y compris l'ECS des maisons individuelles).

En complément, les bâtiments sont dotés de panneaux solaires photovoltaïques placés sur leurs toitures (intégration : panneaux non visibles depuis le sol).

L'électricité est revendue sur le réseau EDF suivant les tarifs de rachat définis chaque trimestre par arrêté.

Des panneaux solaires monocristallins sont pris en compte, courants sur le marché à la date de l'étude. On considère une implantation optimale (35° par rapport à l'horizontale, 0° par rapport au sud).

On considère l'implantation de 11,5 m² de panneaux par logement individuel et de 8,5 m² par logement collectif.

Scénario D : Géothermie sur sondes

Dans ce scénario, des sondes géothermiques sont mises en place (profondeur inférieure à 200 m) et exploitent la chaleur du sous-sol, mais sans échange direct d'eau avec la nappe phréatique. La température constante du sous-sol tout au long de l'année (entre 10 et 12°C) permet de puiser les calories pour chauffer et éventuellement rafraîchir les bâtiments toute l'année.

Les sondes sont dimensionnées pour couvrir les besoins de chauffage et d'ECS.

Le coefficient annuel de performance (COP réel) de la PAC est estimé à 4. Les consommations électriques

¹ Coefficient de performance

des pompes électriques représentent 2 kWhEF par m² et par an.

Au stade de l'étude nous examinons la solution de géothermie sur sondes. Néanmoins une solution de géothermie sur nappe superficielle est également envisageable.

Si cette solution est retenue, des études plus poussées sur le dimensionnement de l'installation (nombre de sondes, profondeur), éventuel appoint gaz devront être menées.

Pour ce scénario, nous n'avons pas pris en compte d'appoint gaz.

Scénario E : Biomasse

Ce scénario est similaire au scénario A, la chaudière au gaz étant remplacée par une chaudière au bois haute performance avec une large plage de modulation, qui assure le chauffage et la production d'ECS.

Ce scénario prend les hypothèses suivantes :

- Logements individuels - Chauffage et production d'ECS par chaudière bois à granulés (approvisionnement aisé, bon rendement, coût plus élevé que les plaquettes).
- Logements collectifs - Chauffage et production d'ECS par chaudière bois à plaquettes (coût attractif, silo à prévoir, rendement moins bon que les granulés).

On considère un rendement des chaudières bois à granulés de 90 %, de celles à plaquettes de 85 % et des pertes liées à la boucle ECS dans les logements collectifs estimées à 20 %.

Dans ce scénario, le coefficient de conversion entre énergie primaire et énergie finale du bois est considéré comme nul, conformément aux règles de calcul BEPOS-Effinergie. En effet le CO₂ libéré lors de la combustion du bois avait auparavant été stocké par l'arbre lors de sa croissance.

Si cette solution est retenue, des études plus poussées sur le dimensionnement des chaudières, des silos à bois, les approvisionnements en bois et d'un éventuel appoint gaz devront être menées. Dans cette étude, nous n'avons pas considéré d'appoint gaz.

Scénario F : Gaz et récupération de chaleur sur les eaux grises

Pour ce scénario, chaque opération est chauffée par chaudière au gaz à condensation et bas-NOx.

On considère un rendement de la chaudière gaz de 99 %.

La production d'ECS est assurée par un système de récupération de chaleur sur les eaux grises.

Ce scénario prend les hypothèses suivantes, pour les logements individuels et collectifs : système sans PAC (très facile à la mise en œuvre, économies d'environ 30 %). Un système avec PAC a été envisagé pour les logements collectifs, mais n'est pas rentable vu la petite taille des collectifs envisagés.

On considère des pertes liées à la boucle ECS dans les logements collectifs de 20 %.



Comparaison des scénarios

Méthode

Consommations et impacts environnementaux

Les consommations à l'état projeté sont estimées, suivant les différents scénarios d'approvisionnement en énergie décrits précédemment.

Sur cette base sont estimés les émissions polluantes (impact environnemental via les émissions de CO₂, SO₂ et NOx).

Une vision globale est présentée sous forme de graphiques pour chaque impact (consommations / pollutions).

L'ensemble des estimations est donné par an.

Impacts financiers

Coût annuel

Sur la base des consommations, les coûts annuels des énergies sont estimés (impact financier).

Une vision globale est présentée sous forme de graphiques.

Approche en coût global de la production de chaud

Une approche en coût globale sur 25 ans est ensuite menée sur la production de chaud (chauffage et ECS). Seule la production de chaud est prise en compte, puisque c'est elle qui varie d'un scénario à l'autre. Les autres coûts (ventilation, éclairage, électroménager...) ne sont pas estimés.

Cette approche vise à estimer les grandes masses financières d'investissement et de coûts des énergies, afin de comparer les solutions entre elles. Ces estimations ne doivent donc pas être considérées en tant que telles, mais bien comme outil d'aide à la décision pour le choix d'approvisionnement en énergie à long terme.

On rappelle que les incertitudes sur l'évolution des prix des énergies et des investissements sont fortes dans une approche en coût global, surtout au stade de création de ZAC.

L'obtention des subventions n'est pas automatique et soumise à un ensemble d'exigences mises à jour tous les ans par l'ADEME via le fonds chaleur. Les subventions ADEME prises en compte dans l'étude sont donc purement indicatives.

Hypothèses

Performance énergétique des bâtiments projetés

Surface des logements

Pour l'estimation des consommations énergétiques, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- Logements individuels - 90 m² SDP¹ par logement.
- Logements collectifs - 70 m² SDP par logement.

Consommations réglementaires

Les seuils de consommations réglementaires (Cepmax RT2012) sont aujourd'hui les suivantes :

- Logements individuels - Cep max = 50 kWhEP/m² par an.
- Logements collectifs - Cep max = 57,5 kWhEP/m² par an.

Pour le projet, on prend pour hypothèse une légère diminution des consommations en seconde phase de l'opération, en cohérence avec les évolutions réglementaires attendues (hors production éventuelle d'énergie renouvelable de compensation pour l'atteinte d'un niveau BEPOS, Bâtiment à Energie POSitive²) :

- Logements individuels :
 - Phase 1 - Cep = 50 kWhEP/m² par an.
 - Phase 2 - Cep = 45 kWhEP/m² par an.
- Logements collectifs :
 - Phase 2 - Cep = 50 kWhEP/m² par an.

Consommations non réglementaires

Les consommations non réglementaires (C_{nr}) sont estimées actuellement sur la base des ratios du label BEPOS Effinergie : 70 kWhEP/m².an pour les logements.

En considérant une évolution globale à la baisse des consommations des équipements ménagers, cohérente avec les évolutions technologiques, les hypothèses pour la présente étude sont les suivantes :

- Phase 1 - C_{nr}ep = 70 kWhEP/m² par an.
- Phase 2 - C_{nr}ep = 60 kWhEP/m² par an.

¹ Surface De Plancher

² C'est-à-dire que le bâtiment produit plus qu'il ne consomme

Coûts et impacts des énergies

Conversion énergie primaire / énergie finale

Conversions EP/EF	Énergie finale EF	Énergie primaire EP
Électricité	1,00 kWh EF	2,58 kWh EP
Gaz	1,00 kWh EF	1,00 kWh EP
Bois (Effinergie BEPOS)	1,00 kWh EF	0,00 kWh EP

Émissions polluantes

Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, contribuant à l'effet de serre. L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est un facteur soupçonné d'être à l'origine du récent réchauffement climatique. Les contributions de la production d'énergie sont données en équivalent CO₂.

Le dioxyde de soufre (SO₂) est l'un des responsables des pluies acides car, dans l'atmosphère, il peut se transformer en acide sulfurique. Il peut avoir également des effets sur la santé humaine (irritation des muqueuses, de la peau, des voies respiratoires).

L'oxyde d'azote (NOx) intervient dans le processus de formation de l'ozone (effet de serre) et contribue au phénomène des pluies acides. Il peut avoir également des effets sur la santé humaine (problèmes respiratoires).

Energies	CO ₂	SO ₂	NOx
Électricité (chauffage)	0,180 kg eq CO ₂ /kWh	0,89 g eq SO ₂ /kWh	0,47 g eq SO ₂ /kWh
Électricité (éclairage)	0,080 kg eq CO ₂ /kWh	0,89 g eq SO ₂ /kWh	0,47 g eq SO ₂ /kWh
Électricité (autre)	0,052 kg eq CO ₂ /kWh	0,32 g eq SO ₂ /kWh	0,27 g eq SO ₂ /kWh
Gaz naturel	0,234 kg eq CO ₂ /kWh	0,00 g eq SO ₂ /kWh	0,17 g eq SO ₂ /kWh
Bois	0,000 kg eq CO ₂ /kWh	0,00 g eq SO ₂ /kWh	0,32 g eq SO ₂ /kWh

Émissions polluantes (source Référentiel HQE, 2015)

Les indicateurs retenus sont issus du Référentiel HQE Tertiaire générique Millésime 2015. Ils s'appliquent aux consommations d'énergie finale.

Les déchets radioactifs retenus sont ceux générés annuellement par l'utilisation de l'électricité du réseau français.

Déchets radioactifs	Electricité
Déchets nucléaires faibles et moyens	0,05 g/kWh
Déchets nucléaires forts et très forts	0,01 g/kWh

Déchets (source Référentiel HQE, 2015)

Prix des énergies

Les éléments ci-après sont issus de la base de données Pégase publiée par le Commissariat général au Développement durable pour l'année 2015.

Les tarifs d'achats du photovoltaïque sont publiés par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer sur la base de l'arrêté tarifaire du 4 mars 2011 et révisés chaque trimestre (tarifs du premier trimestre 2017).

Coût de l'énergie	Particuliers
Électricité	0,1965 €TTC/kWhEF
Gaz naturel	0,0714 €TTC/kWhEF
Bois (granulés)	0,0620 €TTC/kWhEF
Bois (plaquettes)	0,0300 €TTC/kWhEF
Revente électricité photovoltaïque	0,1238 €TTC/kWhEF

Coûts (source CGDD, 2016 et MEEM, 2017)

Indexation des énergies

Les hypothèses des coûts des énergies sont basées sur la base de données Pégase publiée par le Commissariat général au Développement durable pour la période 2007-2015 :

- Augmentation annuelle électricité 3,3 %.
- Augmentation annuelle gaz 3,0 %.
- Augmentation annuelle bois 2,7 %.
- Taux de dégradation annuel de la performance des panneaux photovoltaïques 0,5 %.

Hypothèses sur les prix d'investissement

Gaz

Pour les logements individuels, on considère un coût d'investissement de 4 000 €TTC par logement.

Les coûts d'investissement pour les systèmes au gaz mutualisés sont estimés à 120 €TTC/kW (arrivée gaz, chaudières et auxiliaires de fonctionnement, fumisterie). On considère par ailleurs un ratio de puissance installée de 0,08 kW/m² par logements collectifs.

Ballon thermodynamique

On considère un coût à l'unité de 3 000 €TTC.

Solaire thermique

Sur la base des cas de figures rencontrés en Île-de-France, on estime en moyenne le coût d'investissement à 700 €TTC/m² de panneaux.

Solaire photovoltaïque

Sur la base de l'étude ADEME sur la filière photovoltaïque en France¹, un coût d'investissement de 2,46 €TTC/Wc est pris en compte (Wc = watt crête).

Géothermie sur sondes

Les coûts d'investissement pour les sondes sont issus de l'étude réalisée par l'AFPG (Association Française des Professionnels de la Géothermie)², soit 75 €TTC/ml de sonde.

Pour les PAC, sur la base des prix constatés sur les dernières années, on considère un coût moyen de 85 €TTC/m².

Biomasse

Pour les logements individuels, on considère un coût d'investissement de 7 000 €TTC par logement.

Sur la base de nos retours d'expérience, un ratio de 250 €TTC/kW est pris en compte pour une production mutualisée.

Récupération de chaleur sur les eaux grises

Pour les logements individuels, on considère un coût d'investissement de 1 500 €TTC par logement.

Pour une production mutualisée, on considère un coût de 15 €TTC/m².

Hypothèses sur les subventions

On considère les conditions du Fonds chaleur ADEME 2016. Les principales valeurs seuils sont les suivantes :

- Solaire thermique : surface utile supérieure à 25 m².
- Géothermie sur sondes : production supérieure à 2 tep³ ENR par an.
- Biomasse : production supérieure à 100 tep ENR par an.

On peut prendre en compte une subvention ADEME uniquement pour les solutions collectives de solaire thermique et de géothermie sur sondes.

On considère que 80 % des opérations de logements collectifs peuvent remplir les conditions d'éligibilité du Fonds chaleur ADEME.

Les taux de subventions pris en compte pour les logements collectifs sont les suivants :

- Solaire thermique : 650 € / tep ENR par an sur 20 ans.
- Géothermie sur sondes : 440 € / tep ENR par an sur 20 ans.

1 ADEME, septembre 2015

2 « Les coûts de la géothermie assistée par pompe à chaleur de 2014 »

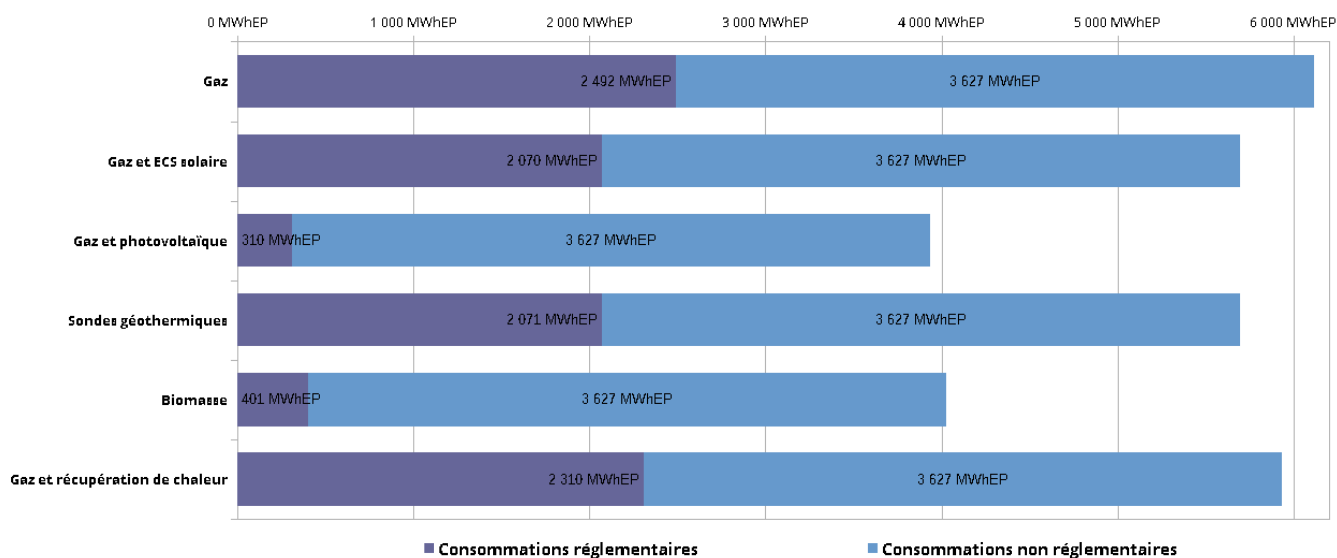
3 Tonne équivalent pétrole / 1 tep = 11,626 MWh

Estimation des consommations

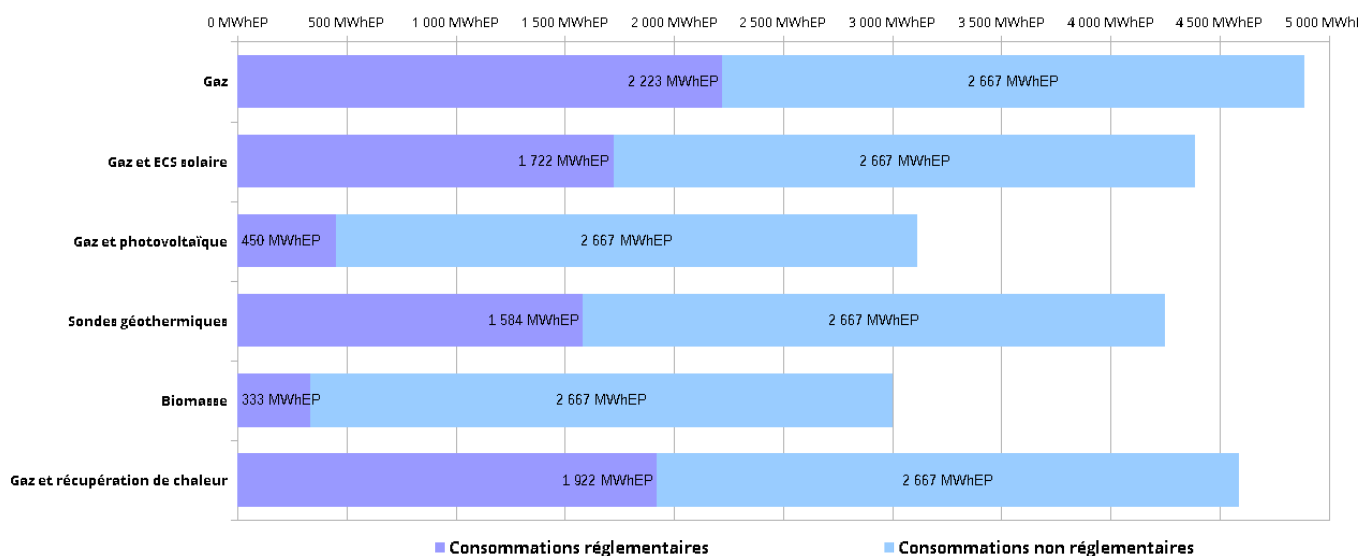
Comparaison des scénarios

Les graphiques ci-dessous permettent une comparaison visuelle des consommations EP estimées pour les différents scénarios étudiés. Le détail par scénario est présenté à la suite. Sur ces graphiques, les consommations réglementaires et non réglementaires sont représentées pour faire ressortir l'impact des solutions énergétiques étudiées et l'importance de ces consommations non réglementaires.

Logements individuels



Logements collectifs



Scénario A : Gaz et ballons thermodynamiques

Logements individuels

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Gaz	19 kWhEF/m ²	1 068 MWhEF	19 kWhEP/m ²	1 068 MWhEP
ECS	Ballon thermodynamique	7 kWhEF/m ²	397 MWhEF	18 kWhEP/m ²	1 023 MWhEP
Autres usages réglementaires (R)	Électricité	3 kWhEF/m ²	155 MWhEF	7 kWhEP/m ²	401 MWhEP
Autres usages non réglementaires (NR)	Électricité	25 kWhEF/m ²	1 406 MWhEF	63 kWhEP/m ²	3 627 MWhEP
Total		53 kWhEF/m ²	3 026 MWhEF	107 kWhEP/m ²	6 119 MWhEP

Ce scénario constitue le scénario de référence auquel les autres scénarios sont comparés pour estimer les éventuelles économies réalisées.

Logements collectifs

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Gaz	20 kWhEF/m ²	889 MWhEF	20 kWhEP/m ²	889 MWhEP
ECS	Gaz	23 kWhEF/m ²	1 000 MWhEF	23 kWhEP/m ²	1 000 MWhEP
Autres usages R	Électricité	3 kWhEF/m ²	129 MWhEF	8 kWhEP/m ²	333 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	23 kWhEF/m ²	1 034 MWhEF	60 kWhEP/m ²	2 667 MWhEP
Total		69 kWhEF/m ²	3 052 MWhEF	110 kWhEP/m ²	4 890 MWhEP

Ce scénario constitue le scénario de référence auquel les autres scénarios sont comparés pour estimer les éventuelles économies réalisées.

Scénario B : Gaz et ECS Solaire

Logements individuels

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Gaz	19 kWhEF/m ²	1 068 MWhEF	19 kWhEP/m ²	1 068 MWhEP
ECS	Solaire / Gaz	11 kWhEF/m ²	601 MWhEF	11 kWhEP/m ²	601 MWhEP
Autres usages R	Électricité	3 kWhEF/m ²	155 MWhEF	7 kWhEP/m ²	401 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	25 kWhEF/m ²	1 406 MWhEF	63 kWhEP/m ²	3 627 MWhEP
Total		57 kWhEF/m ²	3 230 MWhEF	100 kWhEP/m ²	5 697 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			+ 7 %		- 7 %
--------------------------------------	--	--	-------	--	-------

La mise en œuvre de panneaux thermiques induit une augmentation des consommations en EF et une réduction des consommations en EP. Cela s'explique par l'utilisation en scénario de référence de ballons thermodynamiques avec de bons rendements mais alimentés à l'électricité (coefficient de conversion EF / EP de 2,58).

Logements collectifs

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Gaz	20 kWhEF/m ²	889 MWhEF	20 kWhEP/m ²	889 MWhEP
ECS	Solaire / Gaz	11 kWhEF/m ²	500 MWhEF	11 kWhEP/m ²	500 MWhEP
Autres usages R	Électricité	3 kWhEF/m ²	129 MWhEF	8 kWhEP/m ²	333 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	23 kWhEF/m ²	1 034 MWhEF	60 kWhEP/m ²	2 667 MWhEP
Total		57 kWhEF/m ²	2 552 MWhEF	99 kWhEP/m ²	4 389 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			- 16 %		- 10 %
--------------------------------------	--	--	--------	--	--------

Par rapport à une solution tout gaz, ce scénario permet une diminution intéressante des consommations globales.

Scénario C : Gaz et production photovoltaïque

Logements individuels

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Gaz	19 kWhEF/m ²	1 068 MWhEF	19 kWhEP/m ²	1 068 MWhEP
ECS	Gaz	21 kWhEF/m ²	1 202 MWhEF	21 kWhEP/m ²	1 202 MWhEP
Autres usages R	Électricité	3 kWhEF/m ²	155 MWhEF	7 kWhEP/m ²	401 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	25 kWhEF/m ²	1 406 MWhEF	63 kWhEP/m ²	3 627 MWhEP
Photovoltaïque	Électricité	-16 kWhEF/m ²	-915 MWhEF	-41 kWhEP/m ²	-2 361 MWhEP
Total		51 kWhEF/m ²	2 916 MWhEF	69 kWhEP/m ²	3 937 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			- 4 %		- 36 %
--------------------------------------	--	--	-------	--	--------

On constate une faible diminution des consommations en EF et significative des consommations en EP (compensation de l'énergie distribuée par le réseau national). La production d'ECS assurée au gaz et non plus via un ballon thermodynamique pénalise le bilan en EF.

Logements collectifs

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Gaz	20 kWhEF/m ²	889 MWhEF	20 kWhEP/m ²	889 MWhEP
ECS	Gaz	23 kWhEF/m ²	1 000 MWhEF	23 kWhEP/m ²	1 000 MWhEP
Autres usages R	Électricité	3 kWhEF/m ²	129 MWhEF	8 kWhEP/m ²	333 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	23 kWhEF/m ²	1 034 MWhEF	60 kWhEP/m ²	2 667 MWhEP
Photovoltaïque	Électricité	-15 kWhEF/m ²	-687 MWhEF	-40 kWhEP/m ²	-1 773 MWhEP
Total		53 kWhEF/m ²	2 365 MWhEF	70 kWhEP/m ²	3 117 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			- 23 %		- 36 %
--------------------------------------	--	--	--------	--	--------

Le scénario permet une diminution significative des consommations. Cette solution est intéressante notamment vu l'importance des consommations non réglementaires qui représentent plus de la moitié des consommations totales.

Scénario D : Géothermie sur sondes

Logements individuels

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Géothermie	5 kWhEF/m ²	264 MWhEF	12 kWhEP/m ²	682 MWhEP
ECS	Géothermie	5 kWhEF/m ²	297 MWhEF	13 kWhEP/m ²	767 MWhEP
Autres usages R	Électricité	4 kWhEF/m ²	241 MWhEF	11 kWhEP/m ²	622 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	25 kWhEF/m ²	1 406 MWhEF	63 kWhEP/m ²	3 627 MWhEP
Total		39 kWhEF/m ²	2 209 MWhEF	100 kWhEP/m ²	5 698 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			- 27 %		- 7 %
--------------------------------------	--	--	--------	--	-------

Cette solution permet une réduction significative des consommations en EF. Les consommations en EP sont pénalisées par le coefficient de conversion de l'électricité.

Logements collectifs

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Géothermie	5 kWhEF/m ²	220 MWhEF	13 kWhEP/m ²	568 MWhEP
ECS	Géothermie	4 kWhEF/m ²	198 MWhEF	11 kWhEP/m ²	511 MWhEP
Autres usages R	Électricité	4 kWhEF/m ²	196 MWhEF	11 kWhEP/m ²	505 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	23 kWhEF/m ²	1 034 MWhEF	60 kWhEP/m ²	2 667 MWhEP
Total		37 kWhEF/m ²	1 648 MWhEF	96 kWhEP/m ²	4 251 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			- 46 %		- 13 %
--------------------------------------	--	--	--------	--	--------

Cette solution permet une réduction très significative des consommations en EF. Les consommations en EP sont pénalisées par le coefficient de conversion de l'électricité, les consommations restent toutefois nettement inférieures à celles du scénario de référence.

Scénario E : Biomasse

Logements individuels

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Bois granulés	21 kWhEF/m ²	1 175 MWhEF	0 kWhEP/m ²	0 MWhEP
ECS	Bois granulés	23 kWhEF/m ²	1 322 MWhEF	0 kWhEP/m ²	0 MWhEP
Autres usages R	Électricité	3 kWhEF/m ²	155 MWhEF	7 kWhEP/m ²	401 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	25 kWhEF/m ²	1 406 MWhEF	63 kWhEP/m ²	3 627 MWhEP
Total		71 kWhEF/m ²	4 058 MWhEF	70 kWhEP/m ²	4 028 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			+ 34 %		- 34 %
--------------------------------------	--	--	--------	--	--------

Ce scénario présente des consommations en EF nettement supérieures au scénario de base. C'est lié à des rendements moins performants (bois par rapport au gaz et au ballon thermodynamique). Les consommations en EP sont nettement réduites du fait d'un coefficient de conversion considéré nul pour le bois (lié au cycle carbone du bois).

Logements collectifs

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Bois plaquettes	23 kWhEF/m ²	1 035 MWhEF	0 kWhEP/m ²	0 MWhEP
ECS	Bois plaquettes	26 kWhEF/m ²	1 165 MWhEF	0 kWhEP/m ²	0 MWhEP
Autres usages R	Électricité	3 kWhEF/m ²	129 MWhEF	8 kWhEP/m ²	333 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	23 kWhEF/m ²	1 034 MWhEF	60 kWhEP/m ²	2 667 MWhEP
Total		76 kWhEF/m ²	3 363 MWhEF	68 kWhEP/m ²	3 000 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			+ 10 %		- 39 %
--------------------------------------	--	--	--------	--	--------

Ce scénario présente des consommations en EF supérieures au scénario de base. C'est lié à des rendements des équipements moins performants (bois par rapport au gaz). Les consommations en EP sont nettement réduites du fait d'un coefficient de conversion considéré nul pour le bois (lié au cycle carbone du bois).

Scénario F : Gaz et récupération de chaleur sur les eaux grises

Logements individuels

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Gaz	19 kWhEF/m ²	1 068 MWhEF	19 kWhEP/m ²	1 068 MWhEP
ECS	Powerpipe / Gaz	15 kWhEF/m ²	841 MWhEF	15 kWhEP/m ²	841 MWhEP
Autres usages R	Électricité	3 kWhEF/m ²	155 MWhEF	7 kWhEP/m ²	401 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	25 kWhEF/m ²	1 406 MWhEF	63 kWhEP/m ²	3 627 MWhEP
Total		61 kWhEF/m ²	3 471 MWhEF	104 kWhEP/m ²	5 937 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			+ 15 %		- 3 %
--------------------------------------	--	--	--------	--	-------

Par rapport à un ballon thermodynamique, cette solution, qui concerne uniquement la production d'ECS, présente des consommations en EF supérieures (rendement moins bon) et légèrement inférieures en EP (gaz au lieu d'électricité). Malgré ce bilan mitigé rappelons que la récupération de chaleur sur les eaux grises est un système passif très simple nécessitant très peu d'entretien.

Logements collectifs

Postes	Énergie / Système	Consommation d'énergie finale		Consommation d'énergie primaire	
Chaud	Gaz	20 kWhEF/m ²	889 MWhEF	20 kWhEP/m ²	889 MWhEP
ECS	Powerpipe / Gaz	16 kWhEF/m ²	700 MWhEF	16 kWhEP/m ²	700 MWhEP
Autres usages R	Électricité	3 kWhEF/m ²	129 MWhEF	8 kWhEP/m ²	333 MWhEP
Autres usages NR	Électricité	23 kWhEF/m ²	1 034 MWhEF	60 kWhEP/m ²	2 667 MWhEP
Total		62 kWhEF/m ²	2 752 MWhEF	103 kWhEP/m ²	4 589 MWhEP

Comparaison au scénario de référence			- 10 %		- 6 %
--------------------------------------	--	--	--------	--	-------

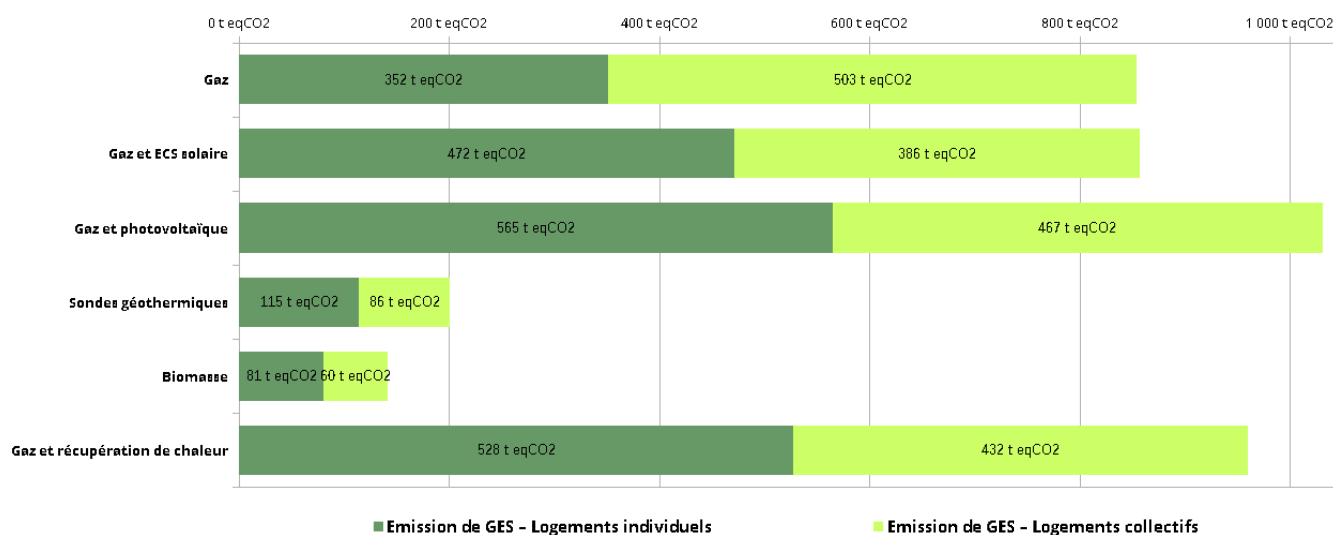
Ce scénario permet une réduction intéressante des consommations par rapport au scénario tout gaz, en privilégiant l'utilisation d'énergie de récupération via un système très simple.

Estimation des impacts environnementaux

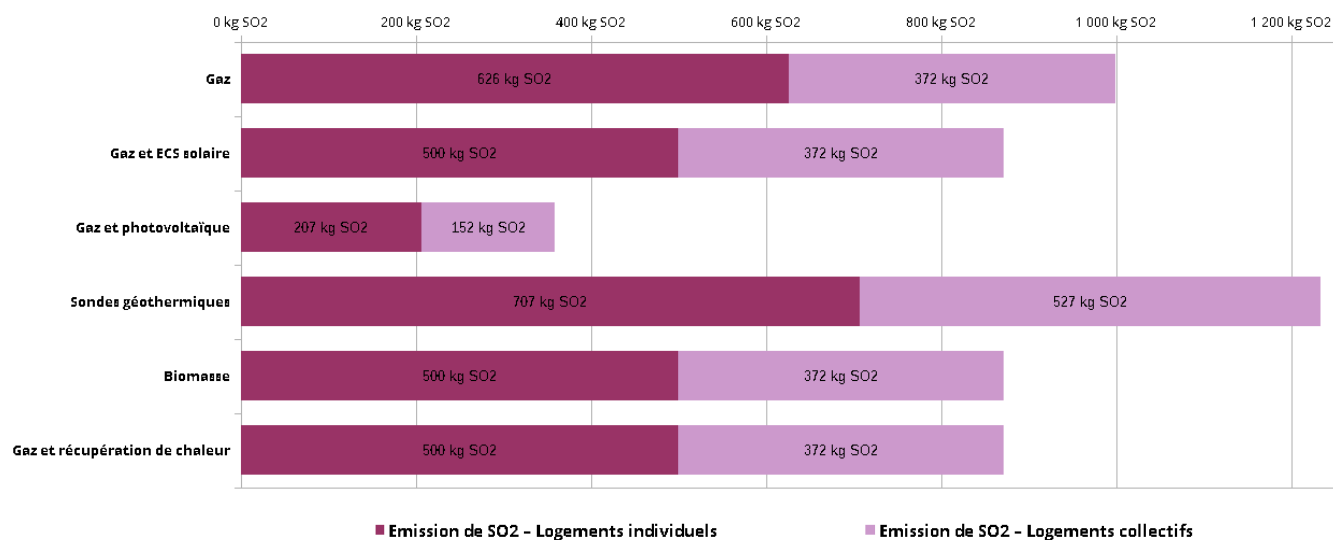
Comparaison des scénarios

Les graphiques ci-dessous donnent une vision d'ensemble des impacts des différents scénarios étudiés en terme d'émissions polluantes et de production de déchets nucléaires. Le détail par scénario est présenté à la suite.

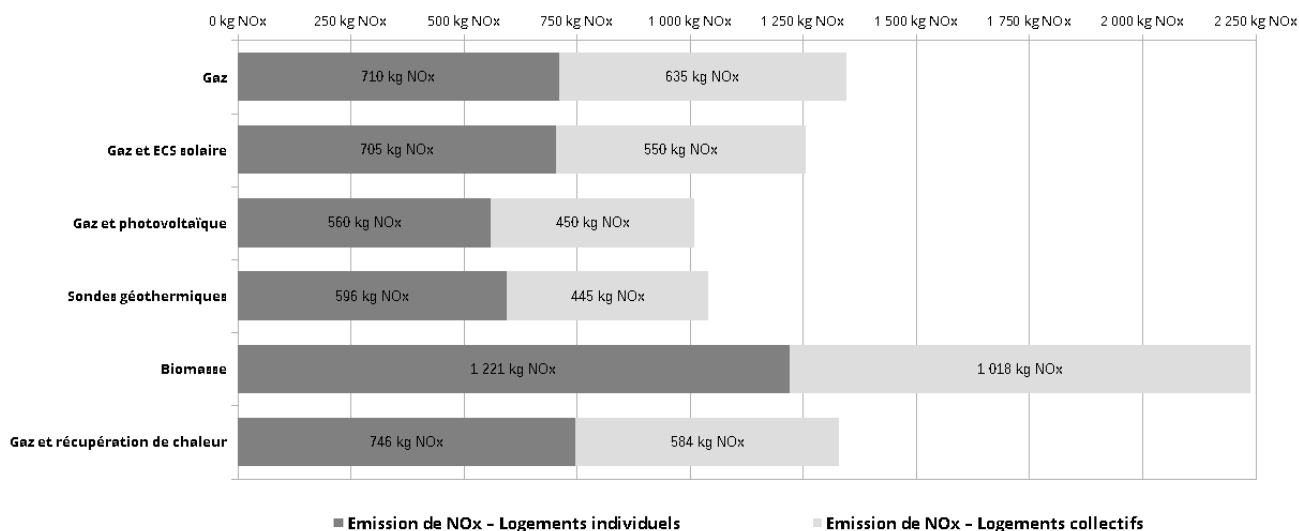
Émissions de gaz à effet de serre (GES)



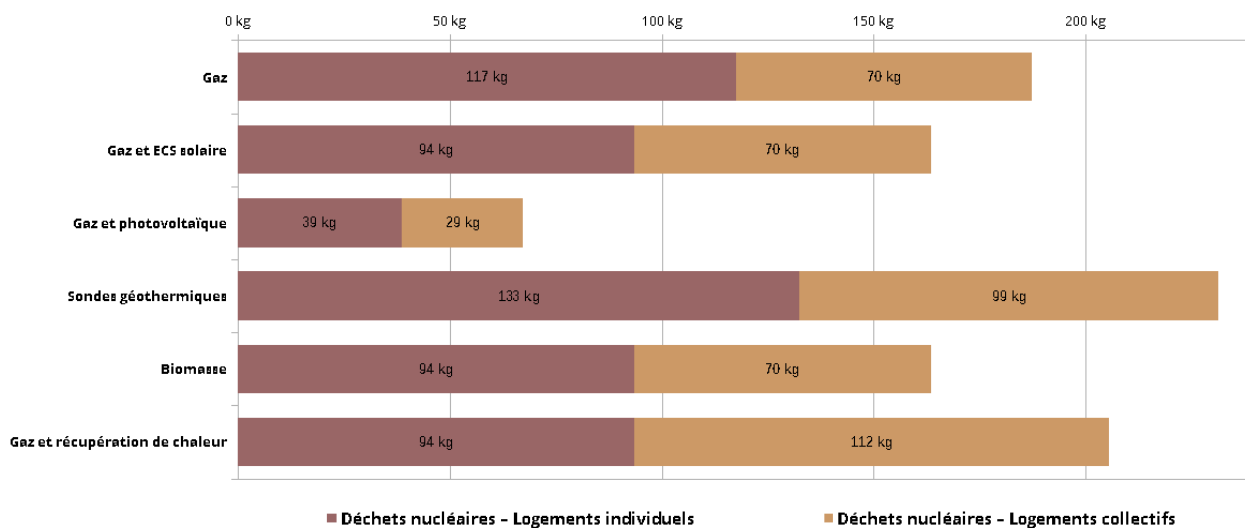
Émissions de dioxyde de soufre (SO₂)



Émissions d'oxyde d'azote (NOx)



Production de déchets nucléaires



On constate que 2 scénarios permettent une réduction très significative des émissions de gaz à effet de serre, la géothermie (utilisation de la chaleur du sol) et la biomasse (cycle carbone du bois).

Le scénario photovoltaïque est celui qui a l'impact le plus positif en terme d'émissions de SO₂.

Concernant les émissions de NO_x, le scénario biomasse ressort comme le plus impactant du fait des fumées. Les réglementations et plans en vigueur, notamment le PPA IDF, établissement des normes et recommandations visant à limiter l'impact des fumées liées aux chaufferies bois.

Le scénario photovoltaïque permet de « compenser » de manière significative la production de déchets nucléaires et ressort comme la solution la moins impactante. Le scénario géothermique, qui fait appel à des PAC électriques, présente le moins bon bilan.

Scénario A : Gaz et ballons thermodynamiques

Postes	Émissions de GES	Émissions de SO2	Émissions de NOx	Déchets nucléaires
Chaud	458 t eqCO2	0 kg SO2	333 kg NOx	0 kg
ECS	255 t eqCO2	127 kg SO2	277 kg NOx	24 kg
Autres usages réglementaires (R)	15 t eqCO2	91 kg SO2	77 kg NOx	17 kg
Autres usages non réglementaires (NR)	127 t eqCO2	781 kg SO2	659 kg NOx	146 kg
Total	854 t eqCO2	999 kg SO2	1 345 kg NOx	187 kg

Scénario B : Gaz et ECS Solaire

Postes	Émissions de GES	Émissions de SO2	Émissions de NOx	Déchets nucléaires
Chaud	458 t eqCO2	0 kg SO2	333 kg NOx	0 kg
ECS	258 t eqCO2	0 kg SO2	187 kg NOx	0 kg
Autres usages R	15 t eqCO2	91 kg SO2	77 kg NOx	17 kg
Autres usages NR	127 t eqCO2	781 kg SO2	659 kg NOx	146 kg
Total	857 t eqCO2	872 kg SO2	1 255 kg NOx	163 kg

Comparaison au scénario de référence	+ 0 %	- 13 %	- 7 %	- 13 %
--------------------------------------	-------	--------	-------	--------

Ce scénario a une incidence positive en termes d'émissions de SO2 et de NOx et de production de déchets nucléaires.

Scénario C : Gaz et production photovoltaïque

Postes	Émissions de GES	Émissions de SO2	Émissions de NOx	Déchets nucléaires
Chaud	458 t eqCO2	0 kg SO2	333 kg NOx	0 kg
ECS	515 t eqCO2	0 kg SO2	374 kg NOx	0 kg
Autres usages R	15 t eqCO2	91 kg SO2	77 kg NOx	17 kg
Autres usages NR	127 t eqCO2	781 kg SO2	659 kg NOx	146 kg
Photovoltaïque	-83 t eqCO2	-513 kg SO2	-433 kg NOx	-96 kg
Total	1 032 t eqCO2	359 kg SO2	1 010 kg NOx	67 kg

Comparaison au scénario de référence	+ 21 %	- 64 %	- 25 %	- 64 %
--------------------------------------	--------	--------	--------	--------

L'incidence de ce scénario est très positive en termes d'émissions de SO2 et de production de déchets nucléaires (compensation). L'incidence en terme d'émissions de GES est négative (émissions supérieures pour la production d'ECS des logements individuels).

Scénario D : Géothermie sur sondes

Postes	Émissions de GES	Émissions de SO2	Émissions de NOx	Déchets nucléaires
Chaud	25 t eqCO2	155 kg SO2	131 kg NOx	29 kg
ECS	26 t eqCO2	159 kg SO2	134 kg NOx	30 kg
Autres usages R	23 t eqCO2	140 kg SO2	118 kg NOx	26 kg
Autres usages NR	127 t eqCO2	781 kg SO2	659 kg NOx	146 kg
Total	201 t eqCO2	1 234 kg SO2	1 041 kg NOx	231 kg

Comparaison au scénario de référence	- 77 %	+ 24 %	- 23 %	+ 24 %
--------------------------------------	--------	--------	--------	--------

Scénario E : Biomasse

Postes	Émissions de GES	Émissions de SO2	Émissions de NOx	Déchets nucléaires
Chaud	0 t eqCO2	0 kg SO2	707 kg NOx	0 kg
ECS	0 t eqCO2	0 kg SO2	796 kg NOx	0 kg
Autres usages R	15 t eqCO2	91 kg SO2	77 kg NOx	17 kg
Autres usages NR	127 t eqCO2	781 kg SO2	659 kg NOx	146 kg
Total	142 t eqCO2	872 kg SO2	2 239 kg NOx	163 kg

Comparaison au scénario de référence	- 83 %	- 13 %	+ 66 %	- 13 %
--------------------------------------	--------	--------	--------	--------

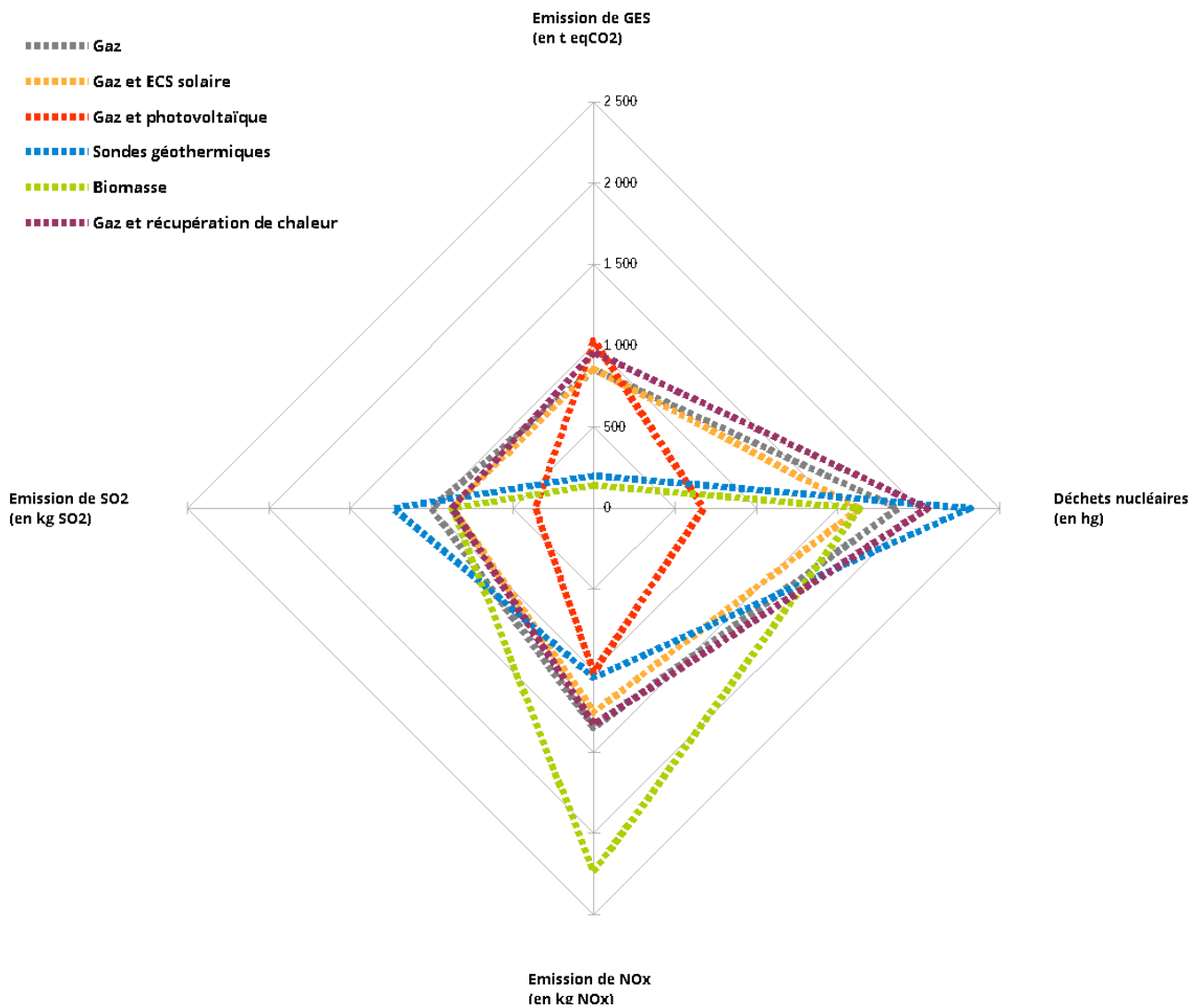
Scénario F : Gaz et récupération de chaleur sur les eaux grises

Postes	Émissions de GES	Émissions de SO2	Émissions de NOx	Déchets nucléaires
Chaud	458 t eqCO2	0 kg SO2	333 kg NOx	0 kg
ECS	361 t eqCO2	0 kg SO2	262 kg NOx	42 kg
Autres usages R	15 t eqCO2	91 kg SO2	77 kg NOx	17 kg
Autres usages NR	127 t eqCO2	781 kg SO2	659 kg NOx	146 kg
Total	960 t eqCO2	872 kg SO2	1 330 kg NOx	205 kg

Comparaison au scénario de référence	+ 12 %	- 13 %	- 1 %	+ 10 %
--------------------------------------	--------	--------	-------	--------

Bilan

Le graphique ci-dessous résume les incidences des différents scénarios sur l'environnement.

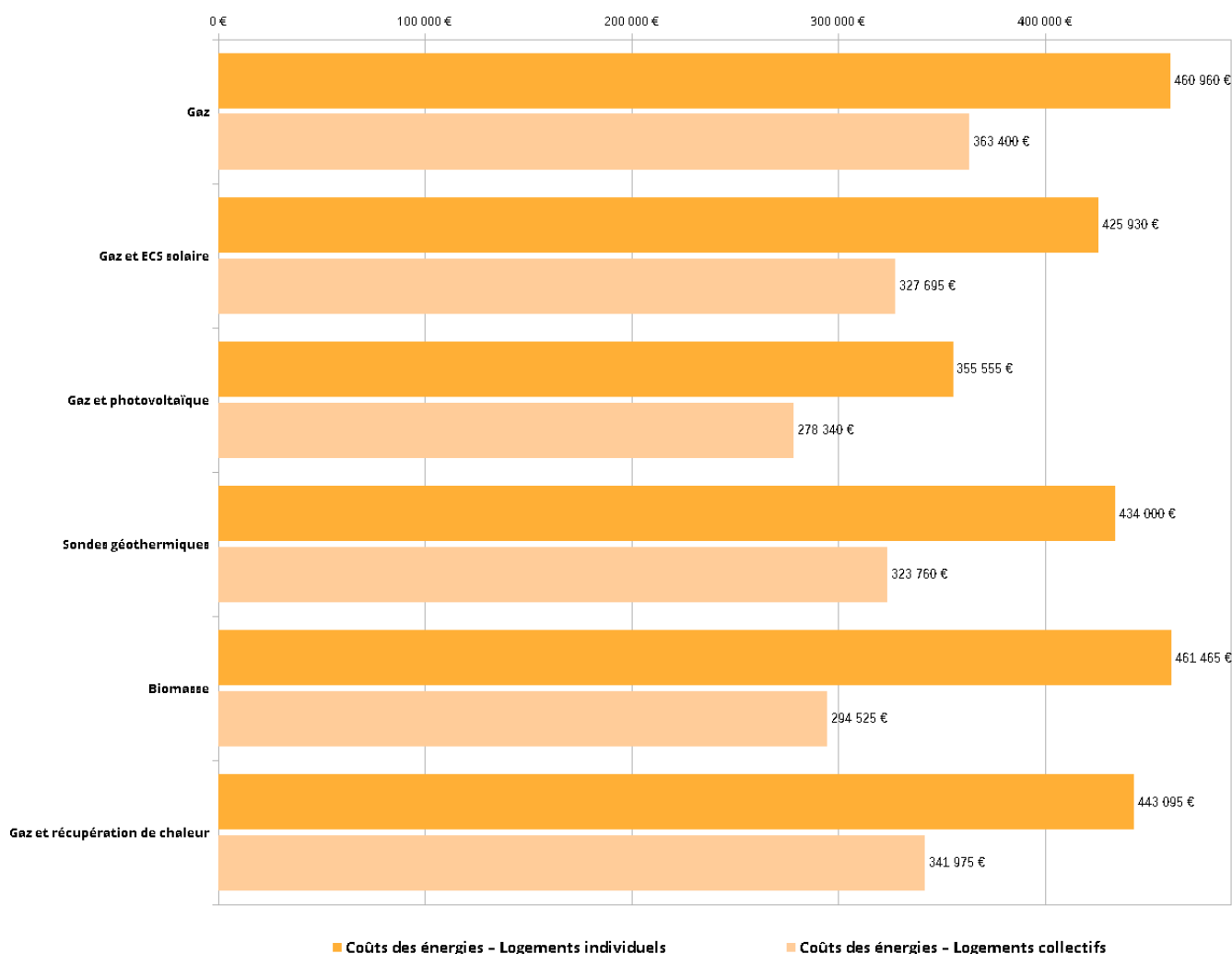


Estimation des impacts financiers annuels

Comparaison des scénarios

Le graphique ci-dessous donne une vision d'ensemble des impacts financiers des différents scénarios étudiés. Le détail par scénario est présenté à la suite.

Globalement l'ensemble des scénarios étudiés présente un bilan annuel financier plus intéressant que le scénario de référence. Le scénario qui ressort est la solution photovoltaïque.



Scénario A : Gaz et ballons thermodynamiques

Postes	Coût des énergies (lgts individuels)	Coût des énergies (lgts collectifs)	Coût total des énergies
Chaud	76 275 €	63 475 €	139 750 €
ECS	77 935 €	71 410 €	149 345 €
Autres usages réglementaires (R)	30 510 €	25 390 €	55 900 €
Autres usages non réglementaires (NR)	276 240 €	203 125 €	479 365 €
Total	460 960 €	363 400 €	824 360 €

Scénario B : Gaz et ECS Solaire

Postes	Coût des énergies (lgts individuels)	Coût des énergies (lgts collectifs)	Coût total des énergies
Chaud	76 275 €	63 475 €	139 750 €
ECS	42 905 €	35 705 €	78 610 €
Autres usages R	30 510 €	25 390 €	55 900 €
Autres usages NR	276 240 €	203 125 €	479 365 €
Total	425 930 €	327 695 €	753 625 €

Comparaison au scénario de référence	- 8 %	- 10 %	- 9 %
--------------------------------------	-------	--------	-------

Ce scénario permet une économie annuelle de l'ordre de 9 % (équivalente pour les logements individuels et collectifs).

Scénario C : Gaz et production photovoltaïque

Postes	Coût des énergies (lgts individuels)	Coût des énergies (lgts collectifs)	Coût total des énergies
Chaud	76 275 €	63 475 €	139 750 €
ECS	85 810 €	71 410 €	157 220 €
Autres usages R	30 510 €	25 390 €	55 900 €
Autres usages NR	276 240 €	203 125 €	479 365 €
Photovoltaïque	-113 280 €	-85 060 €	-198 340 €
Total	355 555 €	278 340 €	633 895 €

Comparaison au scénario de référence	- 23 %	- 23 %	- 23 %
--------------------------------------	--------	--------	--------

L'économie est significative avec ce scénario qui permet de compenser près d'un quart des dépenses énergétiques (par rapport au scénario de référence).

Scénario D : Géothermie sur sondes

Postes	Coût des énergies (lgts individuels)	Coût des énergies (lgts collectifs)	Coût total des énergies
Chaud	51 955 €	43 235 €	95 190 €
ECS	58 450 €	38 910 €	97 360 €
Autres usages R	47 355 €	38 490 €	85 845 €
Autres usages NR	276 240 €	203 125 €	479 365 €
Total	434 000 €	323 760 €	757 760 €

Comparaison au scénario de référence	- 6 %	- 11 %	- 8 %
--------------------------------------	-------	--------	-------

L'économie réalisée avec ce scénario est plus importante pour les logements collectifs, la mutualisation d'une telle solution étant mieux adaptée.

Scénario E : Biomasse

Postes	Coût des énergies (lgts individuels)	Coût des énergies (lgts collectifs)	Coût total des énergies
Chaud	72 805 €	31 065 €	103 870 €
ECS	81 910 €	34 945 €	116 855 €
Autres usages R	30 510 €	25 390 €	55 900 €
Autres usages NR	276 240 €	203 125 €	479 365 €
Total	461 465 €	294 525 €	755 990 €

Comparaison au scénario de référence	+ 0 %	- 19 %	- 8 %
--------------------------------------	-------	--------	-------

La solution biomasse n'apporte pas de bénéfice sur une année pour les logements individuels (coût de l'énergie légèrement inférieur mais moins bon rendement).

Scénario F : Gaz et récupération de chaleur sur les eaux grises

Postes	Coût des énergies (lgts individuels)	Coût des énergies (lgts collectifs)	Coût total des énergies
Chaud	76 275 €	63 475 €	139 750 €
ECS	60 070 €	49 985 €	110 055 €
Autres usages R	30 510 €	25 390 €	55 900 €
Autres usages NR	276 240 €	203 125 €	479 365 €
Total	443 095 €	341 975 €	785 070 €

Comparaison au scénario de référence	- 4 %	- 6 %	- 5 %
--------------------------------------	-------	-------	-------

Ce scénario permet une légère économie annuelle, équivalente pour les logements individuels et collectifs.

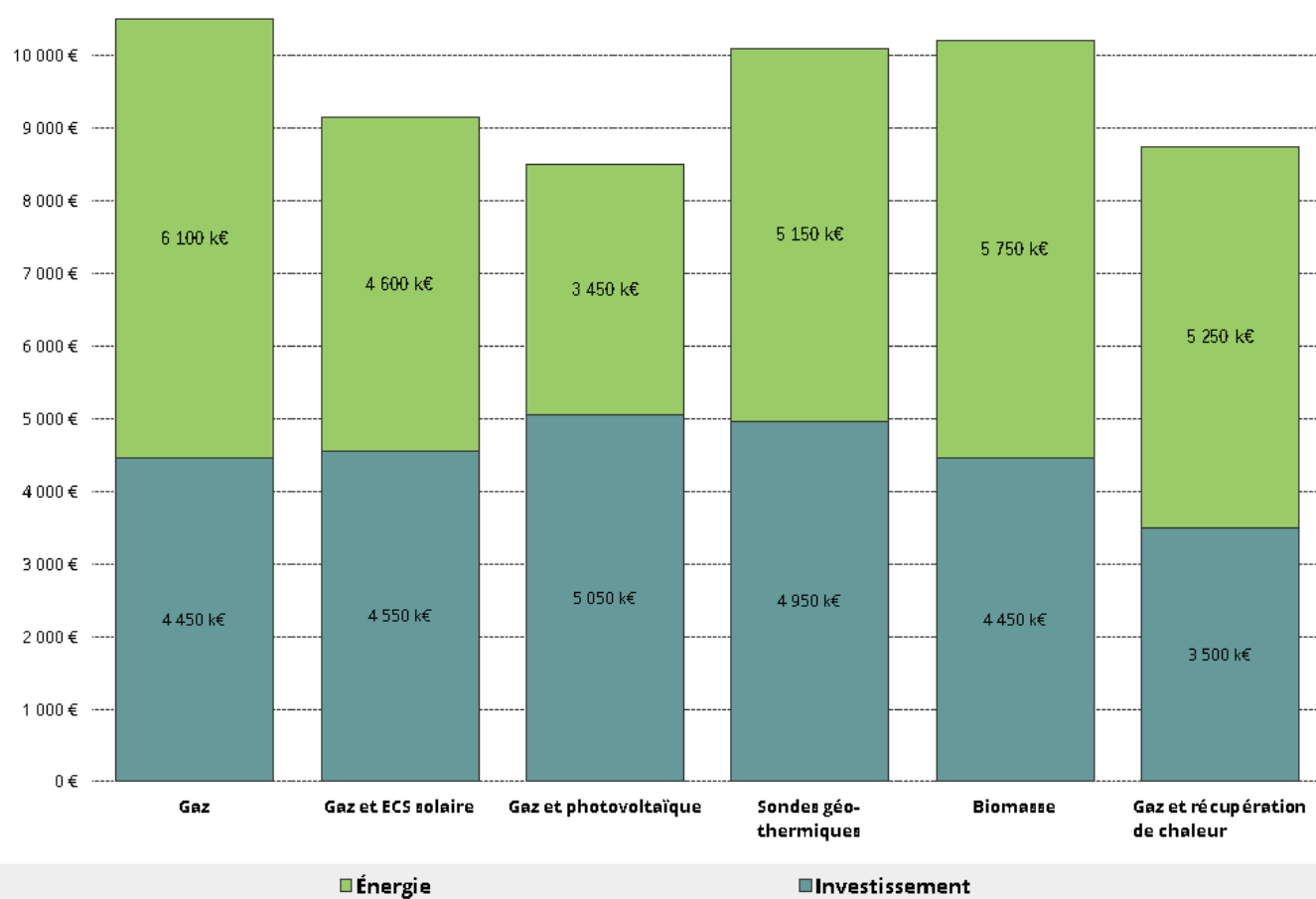
Approche en coût global

Logements individuels

Une approche des coûts d'investissement et d'énergie est proposée sur 25 ans. Elle permet de comparer les différents scénarios entre eux.

Coûts	Gaz	Gaz et ECS solaire	Gaz et photovoltaïque	Sondes géothermiques	Biomasse	Gaz et récupération de chaleur
Investissement	4 450 k€	4 550 k€	5 050 k€	4 950 k€	4 450 k€	3 500 k€
Énergie	6 100 k€	4 600 k€	3 450 k€	5 150 k€	5 750 k€	5 250 k€
Total	10 550 k€	9 150 k€	8 500 k€	10 100 k€	10 200 k€	8 750 k€
Entretien	0 k€	0 k€	0 k€	0 k€	0 k€	0 k€

Économie sur 25 ans	0 k€	-1 400 k€	-2 050 k€	-450 k€	-350 k€	-1 800 k€
Économie annuelle par logement	0 €	- 153 €	- 225 €	- 49 €	- 38 €	- 197 €



Pour les logements individuels, la solution photovoltaïque ressort comme la plus intéressante, elle permet des économies très importantes (225 € par an et par logement). Les solutions de récupération de chaleur sur les eaux grises et d'ECS solaire paraissent également intéressantes avec des économies significatives. Les solutions géothermique et biomasse permettent des économies, mais moins importantes.

Logements collectifs

Coûts	Gaz	Gaz et ECS solaire	Gaz et photovoltaïque	Sondes géothermiques	Biomasse	Gaz et récupération de chaleur
Investissement	900 k€	2 450 k€	2 600 k€	3 850 k€	1 800 k€	1 550 k€
Énergie	5 200 k€	3 800 k€	3 100 k€	3 850 k€	2 450 k€	4 450 k€
Subvention		-350 k€		-800 k€		
Total	6 100 k€	5 900 k€	5 700 k€	6 900 k€	4 250 k€	6 000 k€
Entretien	0 k€	0 k€	0 k€	0 k€	0 k€	0 k€

Économie sur 25 ans	0 k€	-200 k€	-400 k€	800 k€	-1 850 k€	-100 k€
Économie annuelle par logement	0 €	- 13 €	- 25 €	+ 50 €	- 117 €	- 6 €

La solution biomasse ressort comme la plus pertinente économiquement avec des économies importantes. Les solutions solaires et de récupération de chaleur permettent dans une moindre mesure des économies sur 25 ans. La solution géothermique n'est pas amortie.

