



SCCV HORLOGE GASTON ROUSSEL

Ilot D3 - Avenue Gaston Roussel
ZAC de l'Horloge - ROMAINVILLE (93)

Etude de valorisation du potentiel en énergies renouvelables et de récupération (ENR&R)

Rapport

Réf : CICEIF182411 / RICEIF00697-01

BFE / EDL / MCN

30/10/2018




SCCV HORLOGE

GASTON ROUSSEL

Ilot D3 - Avenue Gaston Roussel
 ZAC de l'Horloge - ROMAINVILLE (93)

Etude de valorisation du potentiel en énergies renouvelables et de récupération (ENR&R)

Ce rapport a été rédigé avec la collaboration de :

Objet de l'indice	Date	Indice	Rédaction Nom / signature	Vérification Nom / signature	Validation Nom / signature
Rapport	30/10/2018	01	B. FERRAND	E. LECOMPTE	M. COHEN 

Numéro de contrat / de rapport :	Réf : CICEIF182411 / RICEIF00697-01
Numéro d'affaire :	A46049
Domaine technique :	ER07
Mots clé du thésaurus	ENERGIES RENOUVELABLES

BURGEAP Activité ICE • 143, avenue de Verdun – 92442 Issy-les-Moulineaux CEDEX
 Tél. 33 (0) 1 46 10 25 51
secretariat.ice@groupeginger.com

Résumé non technique à l'attention des décideurs

La présente étude a pour objet d'étudier la faisabilité du potentiel de développement en énergies renouvelables de l'ilot D3 du projet d'aménagement de la ZAC de l'Horloge, mené par la SCCV HORLOGE GASTON ROUSSEL, dans la commune de Romainville (93). Elle répond à l'obligation réglementaire issue de l'article L300-1 du code de l'Urbanisme, qui prévoit qu'une telle étude accompagne tout projet d'aménagement soumis à étude d'impact.

Notons que l'étude ne comprend pas le poste « transports ».

Le terrain en objet de l'étude (ilot D3), d'une superficie d'environ **4 076 m²**, se situe le long de l'avenue Gaston Roussel à Romainville (93).

Cette opération, portée par la société SCCV HORLOGE GASTON ROUSSEL, concerne la construction d'un ensemble immobilier mixte (comprenant des logements et locaux actifs en rez-de-chaussée) et prévoit la réalisation de **10 596 m² de surface de plancher**.

- 9 718 m² de surface de plancher de logements ;
- 878 m² de surface de plancher de commerces (« socle actif »).

Carte 1 : Plan de situation du projet



Source : ALTAREA COGEDIM

Cette mission se déroule en deux temps :

- **Un volet diagnostic**, qui comprend :
 - L'analyse de besoins du projet en chaud et en froid, estimés à 450 MWh/an pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, à 20 MWh/an pour la climatisation, à 105 MWh/an pour les besoins

réglementaires en électricité (éclairage, ventilation) et 190 MWh/an pour les autres usages de l'électricité.

- Une analyse du potentiel en énergies renouvelables du site, qui a permis d'identifier la pertinence du solaire thermique et de la biomasse ;
- **Un volet pré faisabilité**, qui compare deux scénarios renouvelables avec un scénario conventionnel, selon des critères techniques, économiques et environnementaux :
 - Scénario ENR1 : recours à des panneaux solaires pour l'ECS, chaudières gaz à condensation assurant l'appoint en ECS et les besoins de chauffage et production de froid avec des pompes à chaleur aérothermiques
 - Scénario ENR2 : production de chaleur par chaudières biomasse et production de froid avec des pompes à chaleur aérothermiques

Ces 2 scénarios ont été comparés avec le scénario conventionnel suivant :

- Scénario Econv : production de chaleur et d'ECS avec chaudière gaz naturel à condensation et production de froid avec des pompes à chaleur aérothermiques.

L'étude économique a montré que si l'investissement des solutions ENR est plus élevé que la référence (respectivement +220% et +150%), les dépenses réduites en énergies permettent d'obtenir un coût global à 20 ans comparable bien que légèrement supérieur (respectivement +7% et +6%). Les 2 scénarios renouvelables étudiés permettent par ailleurs une moins forte sensibilité à l'évolution des prix de l'énergie.

En termes d'impacts environnementaux, les émissions de gaz à effet de serres sont réduites par rapport au scénario conventionnel respectivement de -30 % et -90 % pour les scénarios EnR 1 et EnR 2.

SOMMAIRE

Résumé non technique à l'attention des décideurs	3
1. Introduction	8
1.1 La (petite) histoire des hydrocarbures	8
1.2 Effet de serre, réchauffement planétaire et changements climatiques	9
1.3 Notre vision de la problématique énergétique	10
1.4 Contexte réglementaire	11
1.4.1 La loi Grenelle	11
1.4.2 La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte	11
2. Méthodologie.....	12
CAHIER 1	13
3. Caractéristiques du projet	14
3.1 Périmètre d'étude	14
3.2 Données collectées et scénario d'aménagement	16
3.2.1 Scénario d'aménagement	16
3.2.2 Stratégie énergétique locale.....	16
3.3 Caractérisation des besoins	16
3.3.1 Energie primaire, finale et utile	16
3.3.2 Choix du niveau de performance thermique	17
3.3.3 Recours au froid.....	17
3.3.4 Besoins du site.....	18
4. Analyse du potentiel en Energies Renouvelables et de Récupération . 21	
4.1 Les réseaux de chaleur ou de froid.....	21
4.1.1 Raccordement à un réseau existant.....	21
4.1.2 Création	21
4.2 L'énergie hydraulique	22
4.3 L'énergie solaire	22
4.3.1 Données climatiques et gisement	22
4.3.2 Le solaire photovoltaïque	23
4.3.3 Le solaire thermique.....	26
4.4 L'énergie éolienne.....	27
4.4.1 Grand éolien (puissance > 350 kW).....	27
4.4.2 Moyen et Petit éolien.....	27
4.5 La combustion de biomasse	28
4.5.1 Le bois énergie.....	28
4.5.2 Biomasse agricole.....	29
4.6 Le biogaz.....	29
4.6.1 Valorisation des déchets	29
4.6.2 Valorisation des sous-produits agro-alimentaires.....	30
4.7 La géothermie	30
4.7.1 Code minier.....	31
4.7.2 La géothermie sur nappe	32
4.7.3 La géothermie sur sondes verticales.....	33
4.8 Récupération de chaleur sur eaux usées	34
4.8.1 Installation collective (à l'ilot).....	34
4.8.2 Installation individuelle (au bâtiment)	34
4.8.3 Installation individuelle (au logement)	34
4.9 L'aérothermie.....	35
4.10 La cogénération.....	35
4.11 Chaleur fatale industrielle	35
4.12 Synthèse de l'analyse de potentiel en EnR	37

5. Conclusions intermédiaires : scénarios énergétiques retenus	39
CAHIER 2	40
6. Dimensionnements techniques	41
6.1 Scénario Econv.....	42
6.2 Scénario EnR 1	43
6.3 Scénario EnR 2	43
7. Analyse multicritère des scénarios retenus	44
7.1 Coûts d'investissements	44
7.2 Analyse économique en coût global	45
7.2.1 Hypothèses économiques	45
7.2.2 Evolution des prix de l'énergie	45
7.2.3 Résultats économiques	46
7.2.4 Résultats environnementaux.....	47
8. Autres préconisations	47
8.1 Conception architecturale	47
8.2 Intégration architecturale	48
9. Conclusion	49

TABLEAUX

Tableau 1 : programme d'aménagement pressenti.....	16
Tableau 2 : besoins en énergie des bâtiments du projet (en kWh/m ² /an).....	18
Tableau 3 : Tarifs de rachat total de l'électricité PV pour le 2 ^{ème} trimestre 2018 en fonction de la puissance installée et du type d'intégration.....	24
Tableau 4 : Tarifs de rachat du surplus de l'électricité PV pour le 2 ^{ème} trimestre 2018 en fonction de la puissance installée et du type d'intégration.....	25
Tableau 5 : synthèse de l'analyse du potentiel du site en énergies renouvelables et de récupération	37
Tableau 6 : coûts estimés des équipements de production énergétique *	45
Tableau 7 : synthèse du comparatif des différents scénarios	50

FIGURES

Figure 1 : consommation énergétique mondiale en million de tonnes équivalent pétrole de 1860 à nos jours (source : Schilling & al., AIE, BP statistical review et Observatoire de l'Energie)	8
Figure 2 : l'histoire très résumée du pétrole conventionnel.....	9
Figure 3 : évolution de la température moyenne planétaire (°C) selon émissions (source : GIEC, AR4).....	9
Figure 4 : évolution de température moyenne pour le scénario A1B (Source : GIEC, AR4)	10
Figure 5 : plan masse de la ZAC de l'horloge (version septembre 2017)	15
Figure 6 : plan masse de l'ilot D3 (version octobre 2018)	15
Figure 7 : schéma de la chaîne énergétique	17
Figure 8 : besoins surfaciques en énergie pour les bâtiments du projet.....	18
Figure 9 : besoin en énergie des bâtiments du projet (MWh/an)	20
Figure 10 : besoin en énergie du projet par usage (MWh/an)	20
Figure 11 : plan de masse et toitures du projet	23
Figure 12 : bilan énergétique autoconsommation d'une installation PV	25
Figure 13 : répartition saisonnière des besoins de chaleur d'un logement et des apports solaires.....	26
Figure 14 : Classes de géothermie.....	31

Figure 15 : éligibilité à la géothermie de minime importance du projet pour les installations sur sondes verticales (échangeur fermé)	31
Figure 16 : éligibilité à la géothermie de minime importance du projet pour les installations sur nappe (échangeur ouvert)	32
Figure 17 : carte de potentiel géothermique sur nappe (source : BRGM)	33
Figure 18 : exemple de profil annuel utilisé	41
Figure 19 : exemple de répartition annuelle des puissances appelées – chauffage et ECS	41
Figure 20 : répartition des puissances appelées (chauffage + ECS) des bâtiments du projet – scénario Econv	42
Figure 21 : répartition des puissances appelées (climatisation) des bâtiments du projet – scénario Econv	43
Figure 22 : coût global annualisé des différents scénarios étudiés.....	46
Figure 23 : comparatif environnemental (GES, particules et déchets radioactifs) des scénarios retenus	47

1. Introduction

L'analyse préliminaire de faisabilité du potentiel de développement des énergies renouvelables est initiée avec les premières étapes d'un projet d'aménagement.

Cette analyse doit permettre :

- D'identifier les énergies renouvelables ayant un potentiel de développement à l'échelle de l'opération d'aménagement dès l'avant-projet afin de prévoir leur intégration ;
- De savoir si les projets d'approvisionnement énergétiques associés à ces énergies sont réalisables ;
- D'évaluer les conditions de leur rentabilité.

Il s'agit donc de faire émerger, selon une analyse multicritère (technologie, contraintes de mise en œuvre, investissement, coût global, coût environnemental, etc.), les projets les plus pertinents pour maximiser la part d'énergies renouvelables dans le mix énergétique d'approvisionnement de l'aménagement.

Pour les scénarios d'approvisionnement jugés pertinents (à la suite de l'étude de faisabilité du potentiel de développement des énergies renouvelables), le maître d'ouvrage peut alors procéder à une étude de faisabilité qui fournit avec plus de détails les capacités du gisement, les coûts et les bénéfices du ou des scénarios d'approvisionnement retenus. Si l'intérêt de ces scénarios est confirmé, suivent les étapes de conception et d'ingénierie. Pour les grands projets, ces dernières étapes comprennent des activités de développements, consacrées aux ententes de financement du projet et à l'obtention de tous les permis nécessaires à sa réalisation. Enfin seulement arrive la construction puis la mise en service du projet.

Le présent rapport constitue un guide à destination de l'aménageur présentant les possibilités et le potentiel d'approvisionnement en EnR pour l'aménagement de l'îlot D3 de la ZAC de l'horloge, à Romainville (93). Après un bref rappel des enjeux énergétiques et climatiques à la base des évolutions de la réglementation, nous détaillerons la méthodologie que nous avons appliquée à ce projet.

1.1 La (petite) histoire des hydrocarbures

Les hydrocarbures que nous utilisons ont été constitués à partir de matière organique sédimentée principalement lors du carbonifère (il y a 300 millions d'années). Ils sont utilisés significativement depuis la révolution industrielle, soit le XIX^e siècle :

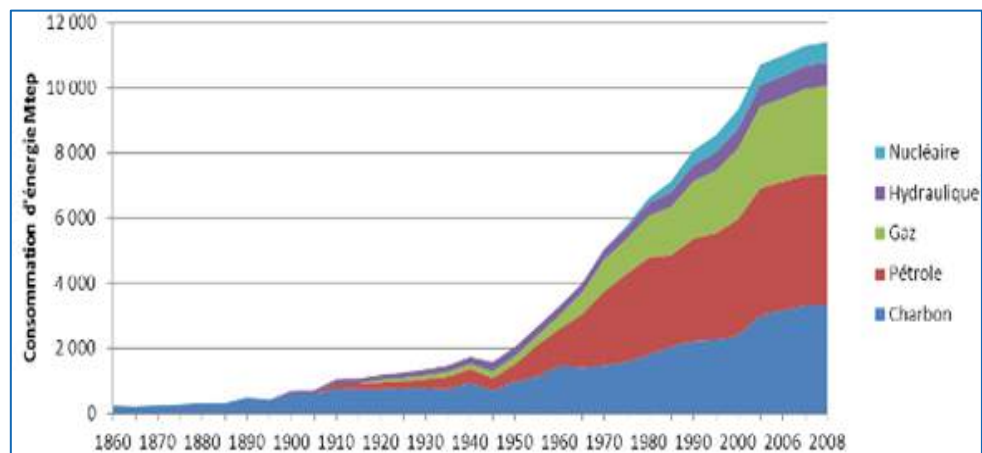


Figure 1 : consommation énergétique mondiale en million de tonnes équivalent pétrole de 1860 à nos jours (source : Schilling & al., AIE, BP statistical review et Observatoire de l'Energie)

Les réserves ultimes en pétrole conventionnel étant limitées, les découvertes de nouveaux champs ne peuvent continuer indéfiniment. L'histoire des hydrocarbures conventionnels peut se résumer ainsi :

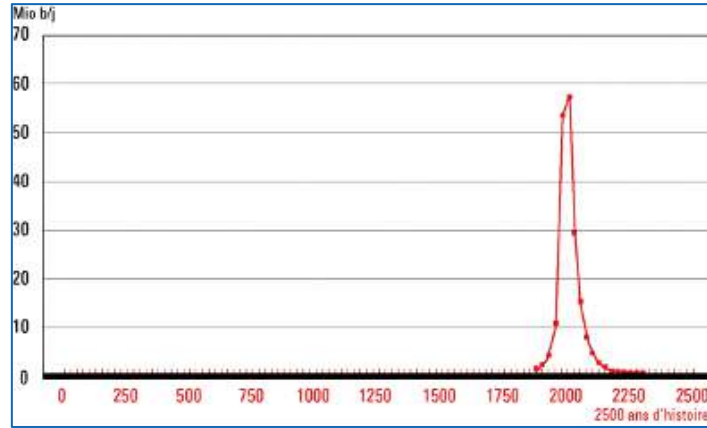


Figure 2 : l'histoire très résumée du pétrole conventionnel

La ressource du pétrole brut répond à une logique de marché : d'une part la loi offre/demande influe sur son prix à moyen terme, d'autre part les logiques spéculatives influent sur son prix à court et moyen terme. Ainsi, bien que les réserves prouvées (découvertes passées) équivalent à une quarantaine d'année de consommation actuelle, la pression du marché fait que son prix risque de restreindre son usage bien avant.

D'un autre côté, le prix de la ressource augmentant, de nouvelles technologies d'extraction de ressources, de valorisation d'énergies renouvelables ou d'efficacité énergétique deviennent compétitives. Ces technologies ne permettront cependant vraisemblablement pas de réduire les coûts d'accès à l'énergie.

1.2 Effet de serre, réchauffement planétaire et changements climatiques

La combustion des hydrocarbures génère du CO₂ dans l'atmosphère. Le CO₂, ainsi que d'autres gaz, absorbe préférentiellement les rayonnements infra-rouge. Ce type de rayonnement est le principal mode de dissipation énergétique du système terrestre. Le rayonnement ainsi absorbé par ces gaz est ensuite réémis, une part vers l'espace, l'autre part vers la planète. C'est par cette réémission en direction de la planète que se manifeste l'effet de serre.

De nombreuses modélisations de l'évolution du climat ont été menées, en prenant en compte divers scénarios de consommation d'hydrocarbures au cours des prochaines années.

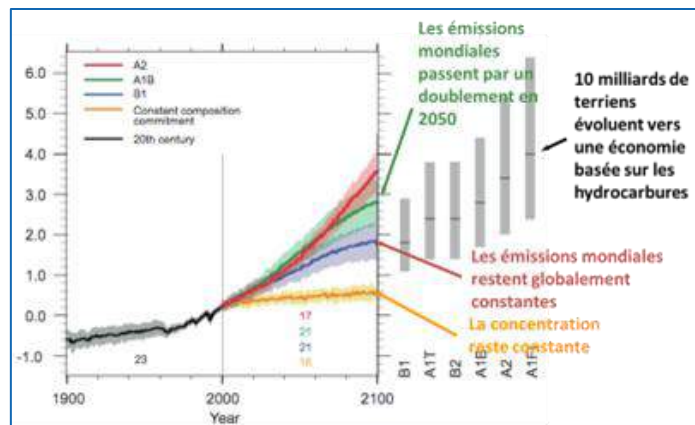


Figure 3 : évolution de la température moyenne planétaire (°C) selon émissions (source : GIEC, AR4)

Les évolutions de température terrestre connues par le passé (glaciations) et envisagées ne sont pas uniformes : on constate que les zones équatoriales conservent une température moyenne annuelle globalement constante : 26°C, y compris pendant les dernières glaciations ; les zones situées au-delà des 45^{èmes} parallèles subissant des variations de température moyenne de l'ordre de 2 à 3 fois l'évolution de la température terrestre moyenne. Cet effet est renforcé dans l'hémisphère nord par rapport à l'hémisphère sud en raison de la répartition des terres émergées (moins d'homogénéisation thermique). On constate ci-après que pour ce scénario (évolution moyenne de +3,5°C à horizon 2100), les évolutions locales vont au-delà de +7°C :

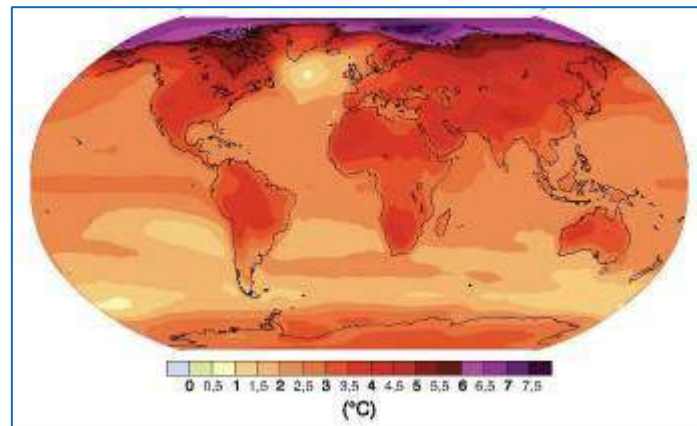


Figure 4 : évolution de température moyenne pour le scénario A1B (Source : GIEC, AR4)

La pluviométrie s'en trouve affectée, ainsi que les climats et les écosystèmes évoluent.

La communauté scientifique estime qu'au-delà de 2°C d'augmentation de température moyenne, des mécanismes interagissant avec le climat sont mis en œuvre de manière non réversible à nos échelles. Le niveau de concentration correspondant est de l'ordre de 550 ppm de CO₂. Le niveau actuel est de 400 ppm environ, avec une augmentation annuelle constatée de 2 à 3 ppm par an.

Pour arrêter de modifier le climat, il faudrait que l'humanité réduise à court terme par deux ses émissions de gaz à effet de serre (les écosystèmes absorbent actuellement la moitié du CO₂ émis, par photosynthèse et dissolution océanique). Soit des émissions restantes d'environ 2 tCO₂e par habitant. Les émissions territoriales de la France, ramenées à la population sont de 8,7 tCO₂e par habitant. Il nous faudrait donc diviser par 4 les émissions de GES à l'échelle de la France. Un objectif politique a été pris en 2003 par le gouvernement français de réaliser le "Facteur 4" à horizon 2050.

1.3 Notre vision de la problématique énergétique

Dans ce contexte énergétique et climatique particulier, le recours aux énergies renouvelables (EnR) doit être envisagé comme le dernier maillon d'une chaîne vertueuse visant à réduire les consommations d'énergies fossiles non renouvelables et relocaliser la production d'énergie. Il n'a de sens que si des actions prioritaires sont menées en amont sur les questions de sobriété et d'efficacité énergétique. On entend par sobriété énergétique la suppression des gaspillages par la responsabilisation de tous les acteurs, du producteur aux utilisateurs. L'efficacité énergétique quant à elle consiste à réduire le plus possible les pertes par rapport aux ressources utilisées. Ainsi les actions de sobriété et d'efficacité réduisent les besoins d'énergie à la source. Les EnR doivent alors être encouragées et favorisées pour satisfaire le solde des besoins d'énergie dans le but d'équilibrer durablement ces besoins avec les ressources disponibles et limiter le recours aux énergies non renouvelables. La présente étude s'inscrit dans cette démarche.



1.4 Contexte réglementaire

1.4.1 La loi Grenelle

La loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'Environnement, dite Grenelle I, établit le programme de mise en œuvre des conclusions de la consultation nationale sur la politique de l'environnement. Le texte est composé de 57 articles regroupés en 5 grands titres :

- Lutte contre le changement climatique
- Biodiversité, écosystème et milieux naturels
- Prévention des risques pour l'environnement et la santé, prévention des déchets
- Etat exemplaire
- Gouvernance, information et formation

L'article 8 de la présente loi, transcrit à l'article L300-1 du Code de l'Urbanisme stipule que « *Toute action ou opération d'aménagement faisant l'objet d'une étude d'impact 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'article 4 de la présente loi établit les grandes lignes de la Réglementation Thermique 2012, dont les modalités sont fixées par l'arrêté du 26 octobre 2010. Elle limite notamment à 50 kWh d'énergie primaire (modulable) la consommation maximale annuelle surfacique pour les usages suivants : chauffage et auxiliaires, eau chaude et auxiliaires, ventilation, climatisation et éclairage.

1.4.2 La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte

La loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte ainsi que les plans d'action qui l'accompagnent doivent permettre à la France de contribuer plus efficacement à la lutte contre le dérèglement climatique et de renforcer son indépendance énergétique en équilibrant mieux ses différentes sources d'approvisionnement.

Les objectifs de la loi précisent ou renforcent ceux établis par les lois Grenelle :

- Réduire nos 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 notre consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012.
- Réduire notre consommation énergétique primaire d'énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à la référence 2012.
- Porter la part des énergies renouvelables à 32 % de la consommation finale d'énergie en 2030 et à 40 % de la production d'électricité.
- Diversifier la production d'électricité et baisser à 50 % la part du nucléaire à l'horizon 2025.
- Réduire de 50 % les déchets mis en décharge à l'horizon 2025.

2. Méthodologie

L'étude proposée par BURGEAP se déroule en deux phases :

- Diagnostic (cahier 1) ;
 - Caractérisations des besoins énergétiques du projet,
 - Analyse du potentiel en énergies renouvelables et de récupération,
- Faisabilité (cahier 2) ;
 - Pré dimensionnement,
 - Analyse multicritère.

CAHIER 1



3. Caractéristiques du projet

3.1 Périmètre d'étude

L'étude de faisabilité du potentiel de développement des énergies renouvelables et de récupération, notée « étude de faisabilité EnR » par la suite, concerne l'îlot D3 de la ZAC de l'horloge, située dans la commune de Romainville (93).

Le terrain en objet de l'étude, d'une superficie d'environ **4 076 m²**, se situe le long de l'avenue Gaston Roussel à Romainville (93).

Cette opération, portée par la société SCCV HORLOGE GASTON ROUSSEL, concerne la construction de d'un ensemble immobilier mixte (comprenant des logements et locaux actifs en rez-de-chaussée) et prévoit la réalisation de **10 596 m² de surface de plancher**.

- 9 718 m² de surface de plancher de logements ;
- 878 m² de surface de plancher de commerces (« socle actif »).



Source : ALTAREA COGEDIM

Carte 2 : Plan de situation du projet

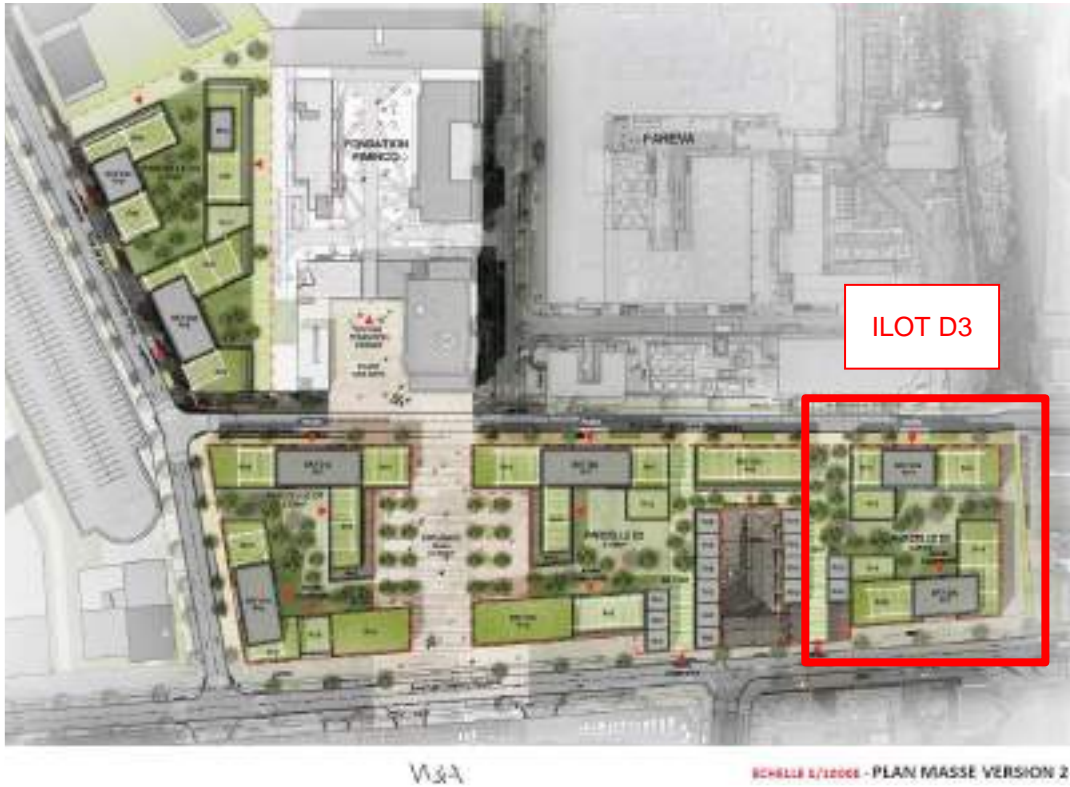


Figure 5 : plan masse de la ZAC de l'horloge (version septembre 2017)

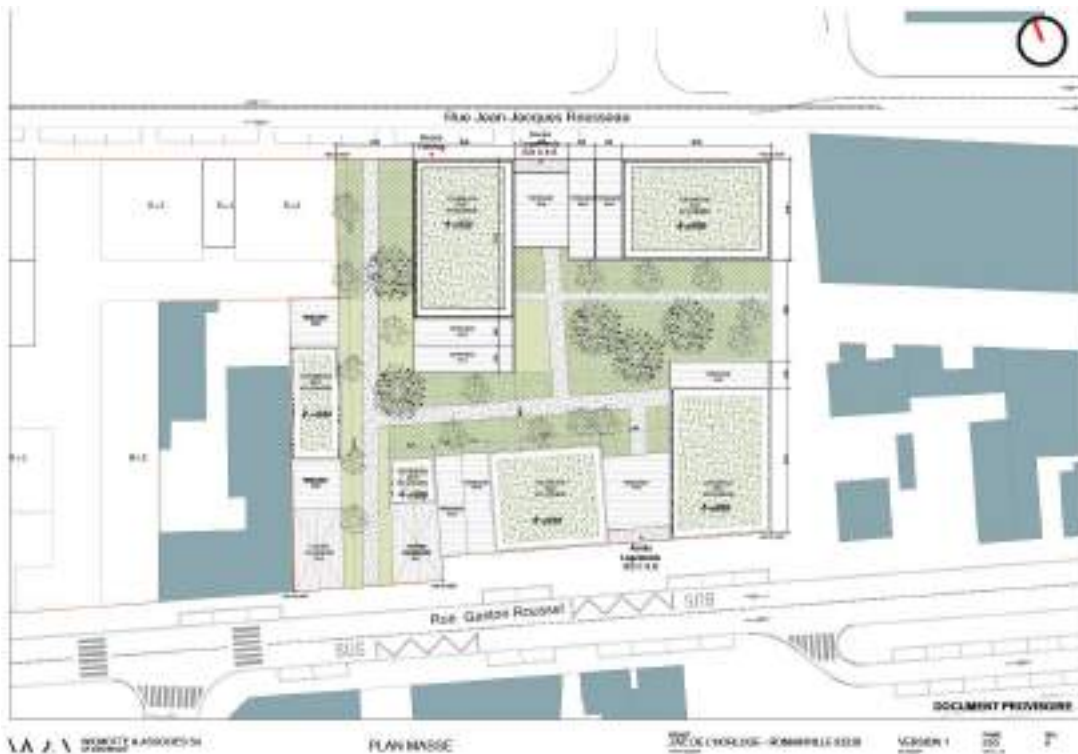


Figure 6 : plan masse de l'îlot D3 (version octobre 2018)

3.2 Données collectées et scénario d'aménagement

3.2.1 Scénario d'aménagement

Le scénario d'aménagement prévoit la construction de :

Tableau 1 : programme d'aménagement pressenti

Typologies	Total (m ²)
Logements en collectif	9 718
Commerces et activités (socle actif)	878
TOTAL	10 596

3.2.2 Stratégie énergétique locale

Le SRCAE de la Région Ile de France détermine les orientations à suivre pour préserver la qualité de l'air et lutter localement contre les changements climatiques, notamment pour réaliser le « facteur 4 » d'ici 2050 :

- Réduction de 17% des consommations énergétiques liées au bâtiment d'ici 2020 et de 50% à horizon 2050 ;
- Couverture des consommations par des énergies renouvelables et de récupération de l'ordre de 11% en 2020 et 45% en 2050.

3.3 Caractérisation des besoins

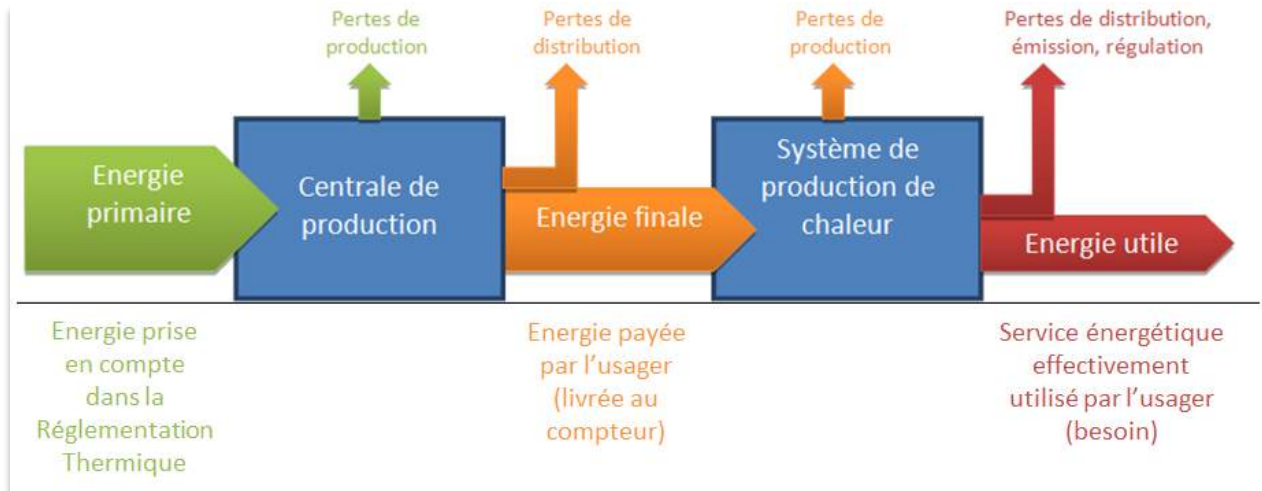
3.3.1 Energie primaire, finale et utile

Les concepts d'énergie primaire, finale et utile sont abondamment utilisés dans les problématiques énergétiques et doivent être clairement compris par le lecteur. Ils caractérisent les performances d'une filière énergétiques depuis l'amont (énergie primaire) jusqu'à l'aval (énergie utile).

On distingue ainsi :

- **Énergie primaire** (en kWh_{EP}) : énergie brute (non transformée) puisée dans l'environnement (houille, lignite, pétrole brut, gaz naturel, etc.). Concernant la production d'électricité à partir de combustible nucléaire, l'énergie primaire fait référence à la chaleur produite par le combustible avant transformation en électricité ;
- **Énergie finale** ou disponible chez l'utilisateur (en kWh_{EF}) : énergie qui se présente sous sa forme livrée pour sa consommation finale (essence à la pompe, fioul ou gaz « entrée chaudière », électricité aux bornes du compteur, etc.) ;
- **Énergie utile / besoin** (en kWh_{EU}) : énergie qui réalise effectivement la tâche voulue pour l'utilisateur après la dernière conversion par ses propres appareils (rendement global d'exploitation). Dans le cas de la chaleur délivrée à l'usager, on parle souvent de besoins de chaleur.

Le schéma de la chaîne énergétique, présentant les divers jeux de conversion entre les différentes formes d'énergie, est disponible ci-dessous :

Figure 7 : schéma de la chaîne énergétique


3.3.2 Choix du niveau de performance thermique

Il a été choisi de travailler sur un **niveau de performance allant au-delà du niveau réglementaire RT 2012**, conformément à l'ambition de répondre aux exigences du **label Effinergie+**.

En logement collectif, les principales exigences de ce label sont les suivantes :

- $B_{bio} \leq B_{biomax} - 20\%$,
- $C_{ep} \leq C_{epmax} - 20\%$,

Par ailleurs, au niveau de la ZAC de l'horloge, l'aménageur a fixé un objectif de couverture d'au moins **40% des besoins en eau chaude sanitaire** par des énergies renouvelables et de récupération.

La RT2012 fixe une consommation maximale d'énergie primaire annuelle surfacique notée C_{epmax} , pour les usages suivants :

- la production de chaleur pour le chauffage,
- la production de chaleur pour l'Eau Chaude Sanitaire (ECS),
- la production de froid,
- l'électricité réglementaire : éclairage des locaux, auxiliaires de chauffages et de ventilation.

Ce facteur C_{epmax} est modulable en fonction du climat et de la solution d'approvisionnement énergétique retenue, etc. Cependant, la présente étude est centrée sur la production énergétique : pour que la comparaison garde un sens physique, il a été décidé ici de travailler avec des bâtiments de même performance thermique quelle que soit la solution étudiée (i.e. avec des besoins en énergie utile identiques).

De plus, la RT 2012 est un mode de calcul à part entière, qui vise moins à prévoir les consommations énergétiques du futur bâtiment qu'à mettre en place une méthode de calcul transposable.

Par soucis de présenter une analyse économique globale réaliste, les ratios utilisés sont des ratios qui correspondent à une conception RT 2012 (type et épaisseur d'isolant, surface vitrée, etc.) avec une consommation obtenue légèrement supérieure au seuil théorique autorisé, tendance souvent observée.

De surcroît, le respect de la RT 2012 impose le recours à une source d'énergie renouvelable pour les logements individuels.

3.3.3 Recours au froid

Aucun usage de climatisation n'est pris en compte dans les logements, qui devront faire l'objet d'une conception bioclimatique soignée pour éviter le recours au rafraîchissement actif.

Il est en revanche présent dans les commerces.

3.3.4 Besoins du site

L'estimation des besoins énergétiques est réalisée sur la base des ratios présentés ci-dessous :

Tableau 2 : besoins en énergie des bâtiments du projet (en kWh/m²/an)

	Logements	Commerces
Chauffage	20	15
ECS	25	0
Climatisation	0	20
Electricité réglementaire	8	25
Electricité non réglementaire	17	25

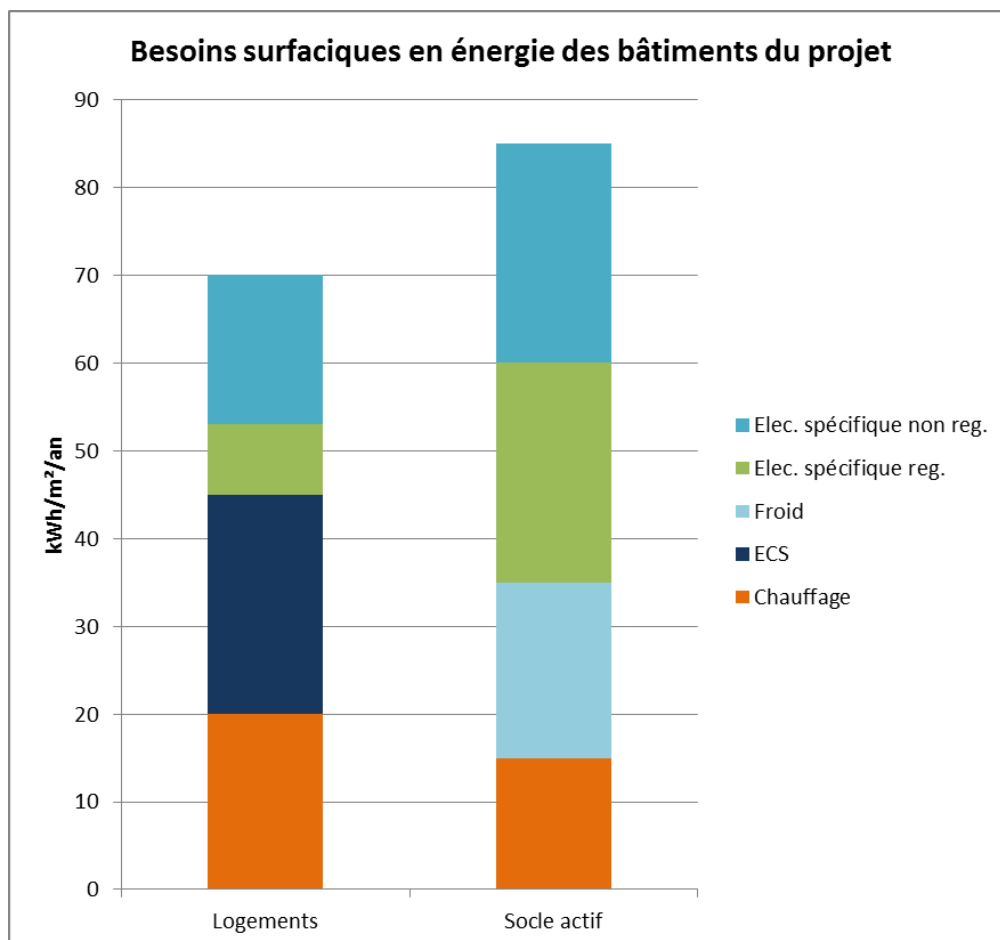


Figure 8 : besoins surfaciques en énergie pour les bâtiments du projet

Sur l'ensemble du projet, les besoins en MWh/an s'élèvent à :

- 208 MWh/an en chauffage,
- 241 MWh/an en ECS,
- 20 MWh/an en froid,
- 103 MWh/an en électricité réglementaire (ventilation éclairage),
- 189 MWh/an en électricité non réglementaire (électroménager, multimédia, etc.).

Ce dernier poste est évidemment une estimation à considérer avec prudence, la consommation réelle **étant très variable suivant le niveau de vie / d'équipement et le comportement des futurs usagers.**

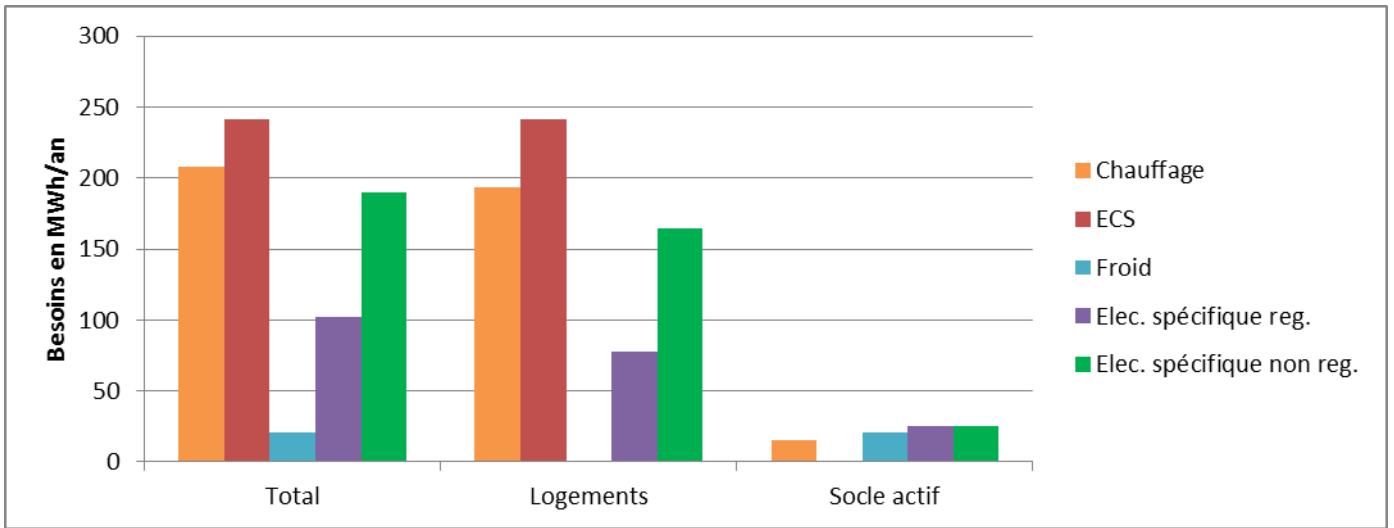


Figure 9 : besoin en énergie des bâtiments du projet (MWh/an)

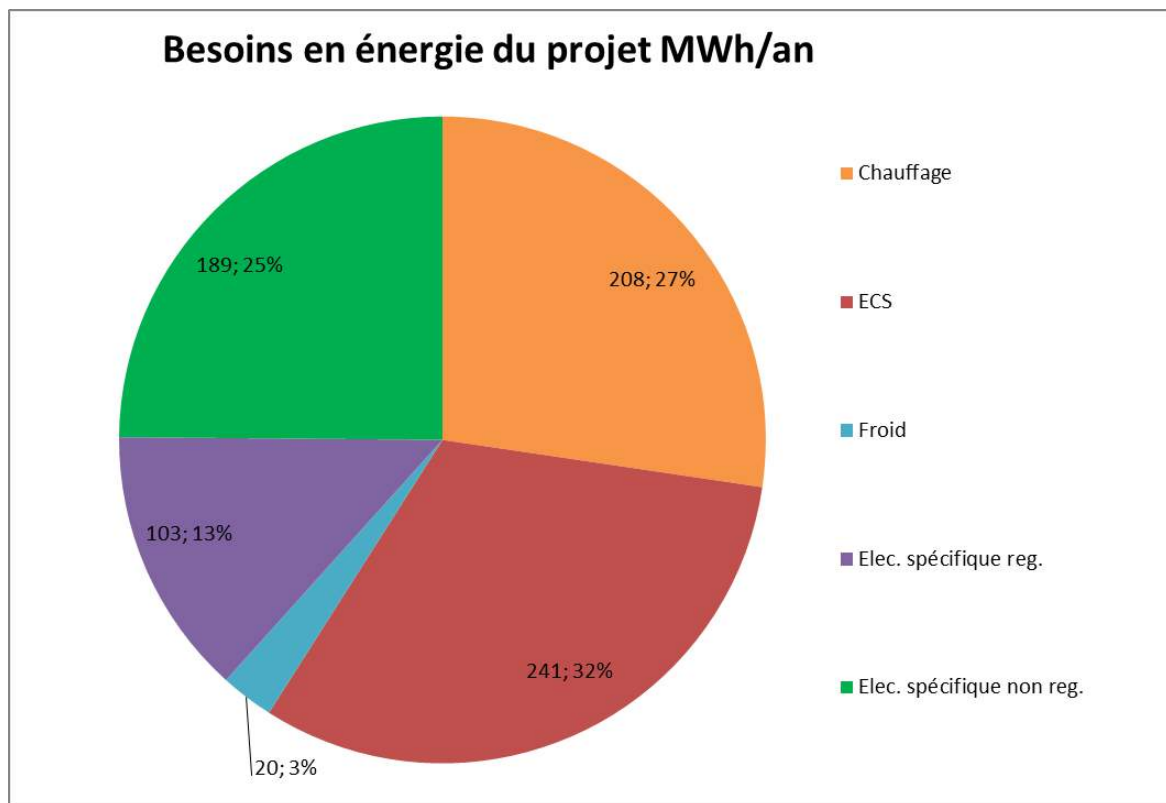


Figure 10 : besoin en énergie du projet par usage (MWh/an)

4. Analyse du potentiel en Energies Renouvelables et de Récupération

4.1 Les réseaux de chaleur ou de froid

L'étude de potentialité du raccord à un réseau de chaleur ou de froid existant ou la création d'un réseau est un des axes de travail obligatoire de l'étude de faisabilité EnR. En effet, ces solutions mutualisées de production énergétique sont un moyen de développer à grande échelle les énergies renouvelables. Le réseau de chaleur permet de bénéficier de l'effet de foisonnement¹ et donc parfois de diminuer les coûts d'investissement. Par contre, ils nécessitent une prise en compte particulière en amont du projet et souvent un portage fort de la part de l'aménageur.

De surcroît, un recours mutualisé à une source énergétique renouvelable est parfois le seul moyen de faire émerger le projet (effet de seuil ou de facteur d'échelle : par exemple dans le cas d'une valorisation de chaleur sur un incinérateur de déchets, le montant des travaux à engager ne peut justifier qu'un recours collectif massif à cette ressource). Ce chapitre est donc déterminant pour le reste de l'étude car il va impacter la faisabilité économique de certaines sources énergétiques.

4.1.1 Raccordement à un réseau existant

Après consultation de la base de données Carmen, aucun réseau de chaleur n'est recensé sur le territoire de la commune.

Les réseaux les plus proches sont ceux de Bobigny et de Bagnolet situés respectivement à 1 km et 1,8 km du site.

Conclusion sur la ressource

Aucun réseau de chaleur existant ne passe à proximité du site.

4.1.2 Création

La taille de l'ilot D3 est insuffisante pour envisager à proprement parler de la création d'un réseau de chaleur dédié.

En revanche, la création d'un réseau de chaleur pourrait avoir du sens à l'échelle de la ZAC de l'horloge. La ZAC de l'horloge dans sa globalité comprendra environ 46 000 m² de logements et 4300 m² d'activités et commerces.

Pour apprécier la pertinence du futur réseau, il faut calculer la densité énergétique du futur réseau. Elle représente la quantité d'énergie distribuée sur la longueur du réseau à installer. Plus la densité du réseau est élevée, plus l'installation est justifiée. A l'inverse, un réseau de faible densité va entraîner trop de pertes en ligne par rapport à l'énergie réellement distribuée. Une estimation de la longueur de réseau nécessaire a été faite d'après le plan d'implantation ci-contre.

La longueur du réseau estimée est de 500 m. L'estimation de la densité d'un réseau pour le projet d'aménagement est donnée ci-dessous :

C_{Ac} – consommation thermique utile en chauffage et ECS annuelle du projet = 2 000 MWh/an

L – longueur du réseau = 500 mètres linéaires

D_c – densité énergétique du réseau de chaleur = C_{Ac}/L = 4 MWh/(ml.an)

¹ Le phénomène de foisonnement est observé quand les usages de chaleur/froid sont désynchronisés sur la zone (usages de jour et de nuit par exemple). Dans ce cas, la mutualisation des systèmes de production énergétique permet un dimensionnement inférieur à la somme des équipements individuels. En pratique, plus la diversité des activités de la zone alimentée par un réseau est grande, plus le foisonnement est grand. Sur des réseaux urbains importants, ce foisonnement peut atteindre 50%, ce qui signifie que l'on peut réduire de moitié la puissance des équipements par rapport à la somme de celles des solutions individuelles.

La densité énergétique estimée est plutôt importante et permet d'envisager la création d'un réseau (elle est nettement au-dessus du seuil d'éligibilité de l'aide Fonds Chaleur de l'ADEME, à savoir 1,5 MWh/ml/an).

Seule la synergie avec des projets hors périmètre de la ZAC (groupe scolaire, etc.) permettrait de densifier le réseau et de justifier son implantation.

Conclusion sur la ressource

La taille du site est insuffisante pour envisager la création d'un réseau de chaleur.

4.2 L'énergie hydraulique

L'hydroélectricité est la première source renouvelable d'électricité en France métropolitaine en termes de production. Les installations hydroélectriques représentent en moyenne 12 à 14% de la production d'électricité (énergie) (soit 1/3 de l'énergie électrique renouvelable), et 25% de la capacité électrique installée (puissance) sur le territoire en 2015 (soit environ 25 000 MW).

Toutefois, aucun cours d'eau ne circule sur site.

Conclusion sur la ressource

Aucun cours d'eau ne circule sur site.

4.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire est présente partout (énergie de flux), intermittente (cycle journalier et saisonnier, nébulosité), disponible (pas de prix d'achat, pas d'intermédiaire, pas de réseau) et renouvelable. Cependant, elle nécessite des installations pour sa conversion en chaleur ou en électricité. Le caractère intermittent impose de se munir d'un système d'appoint pour assurer une production énergétique suffisante tout au long de la journée et de l'année.

Le présent rapport se focalise sur les technologies jugées pertinentes à l'échelle d'une opération d'aménagement : la production d'électricité par panneau solaire photovoltaïque et la production d'eau chaude sanitaire par panneau solaire thermique.

4.3.1 Données climatiques et gisement

A Romainville, le rayonnement solaire annuel reçu par une **surface plane horizontale** est d'environ **1200 kWh/(an.m²)**.

Inclinés à 35°, les panneaux peuvent recevoir un rayonnement annuel atteignant **1380 kWh/(an.m²)**.

Les bâtiments existants aux environs ou projetés sur les îlots voisins sont principalement des R+2 à R+5, les masques induits sont donc faibles.

La surface de toiture disponible et l'ensoleillement sont à mettre en regard des rendements des systèmes de production énergétique afin de conclure s'il y a présence ou non d'un réel potentiel solaire.

► Calcul de la toiture disponible

D'après les surfaces de plancher envisagées, la surface de toiture « brute » du projet serait d'environ 1300 m². Afin de tenir compte d'une compétition entre les usages de toiture (terrasses, toitures végétalisées), des orientations, de la place nécessaire à l'entretien des panneaux et pour éviter les ombres portées entre eux, **la surface disponible retenue pour les panneaux est d'environ 400 m²** (30% de la surface de toiture).



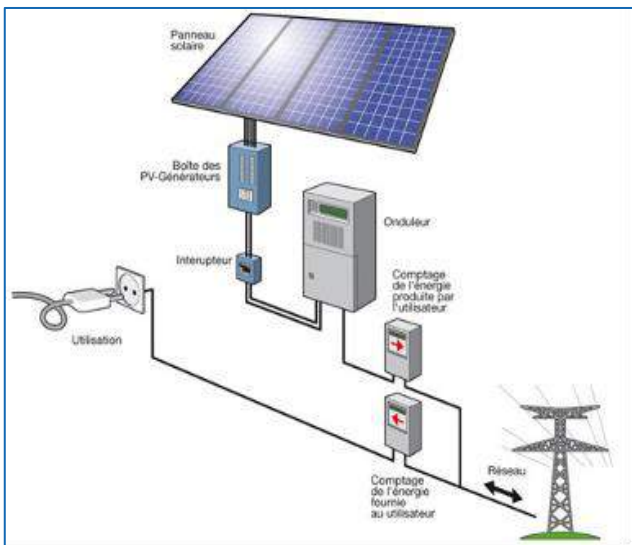
Figure 11 : plan de masse et toitures du projet

4.3.2 Le solaire photovoltaïque

La filière photovoltaïque (PV) peut être séparée en deux types d'application, à savoir les systèmes de production d'électricité autonomes et les systèmes de production d'électricité raccordés au réseau de distribution de l'électricité.

Compte tenu du contexte de la mission, et de la désynchronisation entre les périodes de besoin en électricité et les périodes de production pour les usages électriques majeurs du site, seule la filière photovoltaïque raccordée au réseau sera évoquée par la suite.

Les panneaux solaires PV produisent de l'électricité à l'aide du rayonnement solaire (énergie solaire renouvelable). La performance énergétique d'un système photovoltaïque est influencée par un certain nombre de facteurs, notamment climatiques, technologiques, de conception et de mise en œuvre.



Potentiellement les panneaux solaires photovoltaïques peuvent s'installer partout : en toiture ou en terrasse, en façade, au sol, en écran antibruit, etc. Autant d'endroits possibles tant qu'ils respectent quelques règles de mise en œuvre : orientation favorable et inclinaison optimale (le rendement maximal étant observé lorsque les panneaux sont perpendiculaires au rayonnement solaire direct), sans masques ni ombres portées.

L'électricité produite est sous forme de courant continu. Afin de pouvoir l'injecter dans le réseau, il faut la transformer en courant alternatif et changer sa tension. Des modules appelées onduleurs permettent cette transformation, mais ils représentent un investissement supplémentaire et génèrent de nouvelles pertes énergétiques.

► Production approximative

Capteurs inclinés à 35 °

Ensoleillement annuel : 1380 kWh/m² (toiture plane)

Surface de capteurs solaires : 400 m² (cf. ci-dessus)

Production unitaire des panneaux : 125 kWh/m²/an

Production annuelle : 50 MWh/an

A titre d'information, les besoins en électricité spécifique réglementaire du projet sont estimés à 103 MWh par an. D'après, la surface de capteurs solaires envisagée, la production d'électricité photovoltaïque pourrait **compenser environ 50 % de cette consommation.**

► Condition de raccordement des installations de PV

L'achat de l'électricité photovoltaïque dépend fortement de la puissance installée et de la date du raccordement. Les tarifs sont également révisés régulièrement en fonction du nombre de raccords à l'échelle nationale. De surcroît, le cadre réglementaire est en pleine évolution, notamment de façon à prendre en compte la possibilité d'autoconsommer la production (consommation directe de l'énergie produite sur site) Pour ces raisons, il est difficile d'estimer précisément le gain financier de l'installation.

Si la vente de toute l'électricité produite sur le réseau (mécanisme de vente totale via les tarifs d'achat) était jusque-là la norme, ce système tend à s'essouffler (les tarifs d'achats baissent tous les trimestres). Inversement, l'autoconsommation (consommation prioritaire de l'électricité produite) est en plein essor car le prix de l'électricité conventionnelle augmente et des primes à l'achat sont mises en place dans ce cas de figure. Toutefois l'étude est à réaliser au cas par cas.

Tableau 3 : Tarifs de rachat total de l'électricité PV pour le 2^{ème} trimestre 2018 en fonction de la puissance installée et du type d'intégration

Intégration au bâti	
≤ 3kWc	20,05 cts€/kWh
≤ 9kWc	17,26 cts€/kWh
Intégration simplifiée au bâti	
≤ 3kWc	18,55 cts€/kWh
≤ 9kWc	15,76 cts€/kWh
Non intégré au bâti	
≤ 36kWc	12,07 cts€/kWh

Intégration au bâti	
≤ 100kWc	11,24 cts€/kWh

Inversement, l'autoconsommation (consommation prioritaire de l'électricité produite) est en plein essor car le prix de l'électricité conventionnelle augmente et des primes à l'achat sont mises en place dans ce cas de figure.

Tableau 4 : Tarifs de rachat du surplus de l'électricité PV pour le 2^{ème} trimestre 2018 en fonction de la puissance installée et du type d'intégration

Sur bâtiment	
≤ 3kWc	prime de 390 €/kwc + vente à 10 c€/kWh)
≤ 9kWc	prime de 290 €/kwc + vente à 10 c€/kWh)
≤ 36kWc	prime de 190 €/kwc + vente à 6 c€/kWh)
≤ 100kWc	prime de 90 €/kwc + vente à 6 c€/kWh)
> 100kWc	0

L'intérêt pourrait exister sur les activités « de jour » (commerces, activités), mais ces études doivent être réalisées au cas par cas une fois les consommations finement caractérisées car la simultanéité de la production et de la consommation est un paramètre clé de la faisabilité économique.

Pour information, voici un cas type d'une installation de 3 kWc (environ 30 m²) en autoconsommation pour un logement de 100 m² :

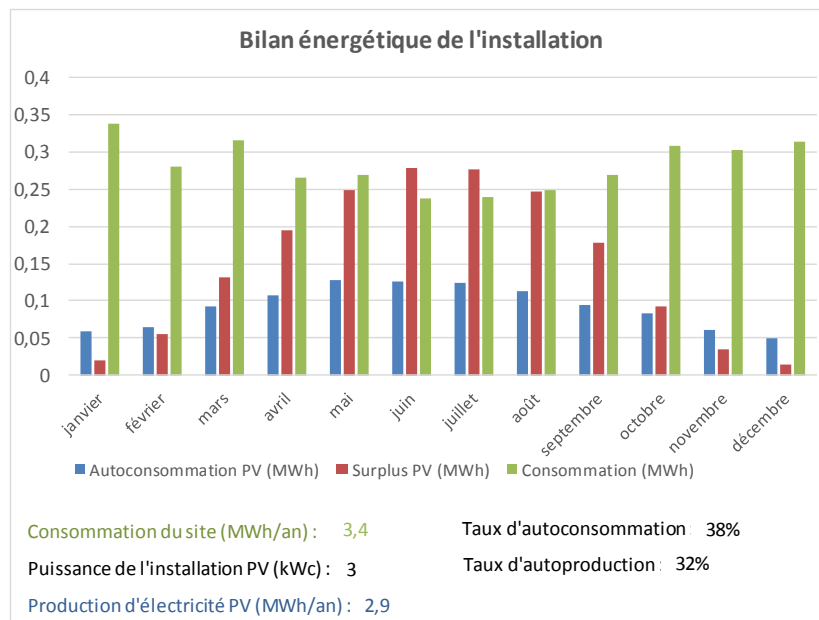


Figure 12 : bilan énergétique autoconsommation d'une installation PV

Une telle installation permettrait de couvrir environ 32% de l'électricité spécifique consommée par le logement (dont 38% consommée directement dans le cas de l'autoconsommation). Aujourd'hui les conditions tarifaires ne permettent néanmoins pas d'envisager une installation en autoconsommation équilibrée sur le plan

économique (faible taux d'autoconsommation). Le choix de la vente totale au réseau s'impose, avec des temps de retour sur investissement longs (15 à 20 ans).

Conclusion sur la ressource

En considérant 750 m² de panneaux solaires photovoltaïques plans (40% de couverture des toitures), la production d'électricité d'origine photovoltaïque est estimée à 75 MWh/an.

Cette solution n'est toutefois pas retenue dans les scénarios mais peut être proposée en option par l'équipe de conception.

4.3.3 Le solaire thermique

Le solaire thermique correspond à la conversion du rayonnement solaire en énergie calorifique. Traditionnellement, ce terme désigne les applications à basse et moyenne température ; les plus répandues dans le secteur du bâtiment sont la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage de locaux.



Cependant, la productivité du solaire thermique est plus élevée en période estivale, lorsque chutent les besoins en chauffage. Pour cette raison, le thermique solaire est utilisé le plus fréquemment pour la production d'eau chaude sanitaire, dont les besoins sont pratiquement constants toute l'année.

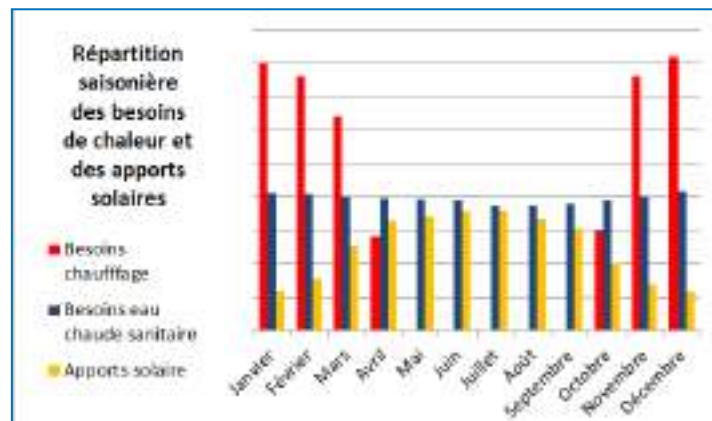


Figure 13 : répartition saisonnière des besoins de chaleur d'un logement et des apports solaires

► Production approximative en fonction de la toiture disponible

R, rendement moyen d'un capteur solaire thermique : 30 %

E, ensoleillement annuel : 1380 kWh/m² (capteurs orientés sud inclinés à 35°)

Sc, surface de capteurs solaires : Sc = 350 m²

PA, production annuelle : PA = E x R x Sc = 145 MWh/an

A titre de rappel, les besoins utiles en ECS du projet peuvent être estimés à 240 MWh/an.

Même si la production n'est pas toujours en adéquation temporelle avec la consommation, le solaire thermique représente donc une opportunité de couvrir une grande fraction des besoins en ECS du projet. (60% avec 350 m² de panneaux solaires thermiques).

Conclusion sur la ressource

La mise en place d'environ 350 m² de panneaux solaires thermiques inclinés à 35 ° et orientés plein sud peut permettre la couverture de 60% des besoins annuels d'ECS.

Cette solution est retenue pour la suite de l'étude.

4.4 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, par l'intermédiaire d'une éolienne. Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau). L'application connecté réseau ou grand éolien représente, en termes de puissance installée, la quasi-totalité du marché éolien. De même que les systèmes solaires, les systèmes éoliens nécessitent la mise en place d'un appoint.

4.4.1 Grand éolien (puissance > 350 kW)

L'installation de grandes éoliennes n'est pas envisageable en milieu urbain à cause des nuisances et des risques générés.

Conclusion sur la ressource

Le grand éolien n'est pas envisageable sur le projet.

4.4.2 Moyen et Petit éolien

Le moyen éolien (36 kW < P < 350 kW) est généralement composé de petites éoliennes à axe horizontal adaptées au milieu rural.

Le petit éolien (< 36 kW) en milieu urbain est peu développé. Pour répondre aux problématiques d'utilisation de l'espace, plusieurs types d'éoliennes à axe vertical se sont développés. Les retours d'expériences montrent une technologie peu fiable voire sans intérêt économique.



Dans les deux cas, il existe beaucoup trop d'incertitudes (vent réellement disponible, direction changeante, efficacité des systèmes) et de contraintes (bruit, structure, maintenance) pour proposer ces solutions à grande échelle. De plus, la faible hauteur des installations les rend très sensibles aux perturbations aérodynamiques engendrées par les bâtiments alentours.

Une note de l'ADEME parue en octobre 2013 rend compte de ces difficultés : « Dans les conditions techniques et économiques actuelles, le petit éolien ne se justifie généralement pas en milieu urbain. Outre le fait que les éoliennes accrochées au pignon d'une habitation peuvent mettre en danger la stabilité du bâtiment, le vent est, en milieu urbain et péri-urbain, en général trop faible ou trop turbulent pour une exploitation rentable ». De surcroît, la loi de finance 2016 a supprimé le petit éolien des systèmes éligibles au crédit d'impôt à partir du 1^{er} janvier.

Conclusion sur la ressource

Le petit et le moyen éoliens présentent un potentiel faible sur le projet.

4.5 La combustion de biomasse

L'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques représente une part importante de l'objectif de la France qui, dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, s'est engagée à porter à hauteur de 23% sa part EnR dans sa consommation énergétique finale d'ici 2020.

La combustion de la biomasse est considérée comme non émettrice de gaz à effet de serre car l'intégralité du CO₂ rejeté dans l'atmosphère lors de sa combustion a été prélevée dans cette même atmosphère lors de la phase de croissance de la biomasse. Sous réserve d'une gestion responsable et durable des forêts (ou autres gisements en biomasse), le bilan CO₂ de photosynthèse-combustion est donc neutre.

Cependant la combustion de 1 kWh PCI de biomasse est pondérée de l'émission de 0,004 à 0,015 kgCO_{2e} (source : ADEME) du aux transformations de la récolte jusqu'à sa mise en forme combustible. Au regard des autres énergies (0,235 kgCO_{2e} pour 1 kWh PCI de gaz produit puis brûlé), la biomasse reste une énergie peu carbonée.

4.5.1 Le bois énergie

La ressource en bois énergie en Ile-de-France est importante et concerne principalement les bois déchets non souillés (classe A) provenant des déchets des ménages, des déchets du BTP et des déchets provenant d'autres activités économiques (315 kt/an) ainsi que le bois forestier (280 kt/an).

Le trafic routier nécessaire à l'approvisionnement en biomasse est une gêne probable (nuisances sonores, encombrement du trafic) pour les riverains. Même si les bâtiments du projet sont relativement peu énergivores, il faut compter *a minima* une à deux livraisons par mois (selon volume du stockage).

Sur la base d'une consommation estimée pour le chauffage et l'ECS, le nombre de livraisons nécessaires en semi-remorques peut être évalué :

C – consommation énergétique efficace annuelle pour le chauffage et l'ECS : 450 MWh/an

PC – pouvoir calorifique moyens des plaquettes forestières : 3 000 kWh/t²

R – rendement moyen des installations de combustion : 80 %

Nt – nombre annuel de tonnes de plaquettes consommées : $Nt = C \times 10^3 / PC / R = 190$ tonnes/an

Ch – chargement moyen d'un semi-remorque : 15 tonnes

NR – nombre annuel de rotations : $NR = Nt / Ch = 13$ rotations/an

Ce schéma d'approvisionnement représente en termes de trafic près de **13 rotations annuelles de livraison** principalement durant la période de chauffe.

Deuxièmement, s'ajoute la problématique de l'espace nécessaire pour la mise en place des chaufferies et pour le dépotage dans des conditions de sécurité satisfaisantes et le stockage, aspect qui doit être pris en compte à ce stade du projet.

Troisièmement, la combustion de biomasse est émettrice de particules, ce qui impacte la qualité de l'air. Toutefois, cette problématique est aujourd'hui globalement maîtrisée, notamment sur les installations collectives et récentes et les équipements actuels permettent de respecter les normes de qualité de l'air en lien avec la problématique francilienne sur ce sujet.

Enfin la solution induit un impact sur le coût d'investissement qui sera à prendre en compte dans l'analyse globale des solutions.

² Le pouvoir calorifique des plaquettes forestières dépend majoritairement de son humidité. La valeur prise ici est une moyenne souvent donnée dans la littérature pour une humidité de 40%.

En conclusion, le bois-énergie présente un potentiel important, permettant de mobiliser une ressource et des emplois locaux.

Conclusion sur la ressource

Le bois-énergie est une source EnR adaptée au projet malgré des contraintes potentielles en matière de taille de locaux techniques et de stockage, de qualité de l'air et d'approvisionnement (13 livraisons par an).
Solution retenue pour la suite de l'étude.

4.5.2 Biomasse agricole

On entend par biomasse agricole les sous-produits d'exploitation ne présentant plus de valorisation possible en termes d'alimentation ou d'utilisation comme matière première techniquement, économiquement et écologiquement viable. Le Grenelle 1 de l'environnement définit clairement cette priorité d'usage au recours de la biomasse en général :

- Priorité 1 : alimentaire,
- Priorité 2 : matériaux,
- Priorité 3 : énergie.

L'utilisation de ces sous-produits en valorisation énergétique est généralement rendue compliquée par la diversité des matériaux (générant autant de procédés différents), leur répartition géographique, leur périodicité de disponibilité et l'absence de filières dédiées. Une grande partie des sous-produits existants est d'ores et souvent déjà utilisée pour des usages agricoles (retour organique à la terre, constitution de litières pour le bétail, etc.). A l'échelle d'un quartier, il est difficile de conclure sur l'existence d'un réel potentiel. Pour mettre en œuvre l'utilisation de cette biomasse, une approche directe, spécifique à chaque producteur, serait à envisager et à mener à l'échelle d'un territoire plus vaste.

Par ailleurs, les considérations menées sur les contraintes du bois énergie (espace, fret, filtration de particules) sont applicables au cas de la biomasse agricole.

Conclusion sur la ressource

Le site ne présente pas de potentiel en biomasse agricole.

4.6 Le biogaz

Le biogaz est un gaz issu de la fermentation de matières organiques animales ou végétales. Une fois récupéré, il peut être valorisé sous forme de chaleur et/ou d'électricité. Deux techniques de production existent : la méthanisation ou la récupération sur centre d'enfouissement technique. Seule la méthanisation dans un digesteur semble adaptée aux contraintes d'un projet d'aménagement urbain.

4.6.1 Valorisation des déchets

Les déchets organiques de cuisine peuvent produire une certaine quantité de biogaz, constitué à la fois de dioxyde de carbone (CO₂) et de méthane (CH₄) dont les proportions peuvent varier selon la qualité des déchets et le processus de méthanisation. Dans le cas d'un digesteur moderne, la teneur en CH₄ du biogaz peut aisément atteindre 50%.

Un habitant français moyen génère chaque année environ 350 kg soit un gisement en énergie de près de 250 kWh/an/personne.

Toutefois, les coûts d'investissement et les coûts de fonctionnement pour la collecte spécifique des déchets à méthaniser rendent ces opérations difficilement rentables. De plus, les déchets issus du quartier feront probablement l'objet de valorisation au niveau des unités collectives de traitement de l'agglomération

(incinération avec production de chaleur et/ou d'électricité pour les déchets solides et biogaz au niveau des STEP). Pour l'ensemble de ces raisons, cette ressource ne sera pas retenue dans la suite de cette étude.

Conclusion sur la ressource

Le site ne présente pas de potentiel en valorisation des déchets.

4.6.2 Valorisation des sous-produits agro-alimentaires

Certaines productions ou certains résidus d'agriculture ou d'élevage ainsi que les boues de STEP peuvent également donner lieu à la production de biogaz via une unité de méthanisation mais les conclusions faites sur la méthanisation des déchets urbains sont également valables pour cette ressource qui ne sera donc pas retenue.

Conclusion sur la ressource

Le site ne présente pas de potentiel en valorisation des sous-produits agro-alimentaires.

4.7 La géothermie

On distingue en géothermie :

- **La géothermie haute énergie** (température supérieure à 150 °C) : il s'agit de réservoirs généralement localisés entre 1 500 m et 3 000 m de profondeur. Lorsqu'un tel réservoir existe, le fluide peut être capté directement sous forme de vapeur sèche ou humide pour la production d'électricité.
- **La géothermie moyenne énergie** (température comprise entre 90 °C et 150 °C) : le BRGM la définit comme une zone propice à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1 000 m. Elle est adaptée à la production d'électricité grâce à une technologie nécessitant l'utilisation d'un fluide intermédiaire.
- **La géothermie basse énergie** (température comprise entre 30 °C et 90 °C) : elle concerne l'extraction d'eau inférieure à 90°C dont le niveau de chaleur est insuffisant pour la production d'électricité mais adapté à une utilisation directe (sans pompe à chaleur) pour le chauffage des habitations et certaines applications industrielles.
- **La géothermie très basse énergie** (température inférieure à 30 °C) : elle concerne les nappes d'eau souterraine et sols peu profonds dont la température est inférieure à 30 °C et qui permet la production de chaleur via des équipements complémentaires (pompe à chaleur notamment).

Les trois premiers types de géothermie nécessitent des investissements importants et sont réservés à des projets d'ampleur (réseau de chaleur ou production d'électricité). Ils demandent par ailleurs des contextes géologiques bien particuliers (recours à la nappe du Dogger en région parisienne par exemple).

La géothermie très basse énergie semble être la plus pertinente en termes de potentiel et de faisabilité technique (réglementation, coûts, etc.). Seule cette forme de géothermie est donc détaillée dans ce rapport. Il est à noter que le recours à ce type de géothermie peut fournir de la chaleur mais aussi un rafraîchissement direct (géocooling) ou une climatisation (via une pompe à chaleur, ou « PAC ») pendant la période estivale.

On recense deux techniques en géothermie très basse énergie :

- La géothermie sur nappe, qui consiste à pomper l'eau de la nappe souterraine pour en extraire les calories dans la pompe à chaleur, puis à la réinjecter dans la nappe,
- La géothermie sur sondes géothermiques verticales, qui consiste à faire circuler un fluide caloporteur dans des sondes (circuit fermé), puis à en extraire la chaleur.

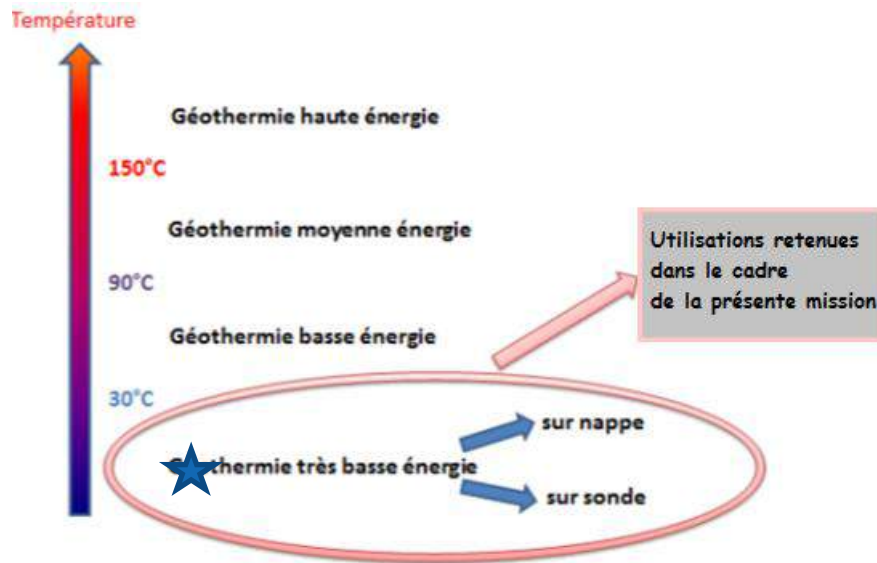


Figure 14 : Classes de géothermie

Ces usages de la géothermie nécessitent l'utilisation d'une pompe à chaleur qui permet d'exploiter au mieux l'énergie d'une source de température modérée.

4.7.1 Code minier

D'un point de vue réglementaire, le nouveau code minier a instauré la notion de gîte géothermique de minime importance de façon à alléger les démarches nécessaires à la mise en œuvre de ces petites installations. Un zonage a été publié pour apprécier l'éligibilité à ce statut de géothermie de minime importance :



Figure 15 : éligibilité à la géothermie de minime importance du projet pour les installations sur sondes verticales (échangeur fermé)



Figure 16 : éligibilité à la géothermie de minime importance du projet pour les installations sur nappe (échangeur ouvert)

La zone d'aménagement est classée comme une zone éligible avec avis d'expert (couleur orange) pour les installations sur sondes et sur nappe.

4.7.2 La géothermie sur nappe

Les études géotechniques préalables et les données disponibles dans la Base du Sous-Sol (BRGM) laissent penser qu'il pourrait être possible de soutirer les débits nécessaires pour la production de chaleur sur le site mais :

- Il faudra potentiellement forer profondément (65 m pour un forage au Lutétien et 80 m pour l'Yprésien) ce qui induit des coûts élevés ;
- La réinjection de l'eau en nappe nécessite de créer un forage de rejet qu'il est impératif d'éloigner du captage de 80 à 100 m (pour éviter le recyclage thermique), ce qui est rendu délicat par la taille de la parcelle

Les débits exploitables probablement supérieurs aux besoins du projet et les coûts fixes des forages fragilisent la pertinence économique de la solution de géothermie sur nappe à l'échelle de l'ilot D3.

A titre d'information, le coût de l'installation géothermique (hors pompe à chaleur) permettant de couvrir les besoins énergétiques du projet est évalué à près de 500 k€.

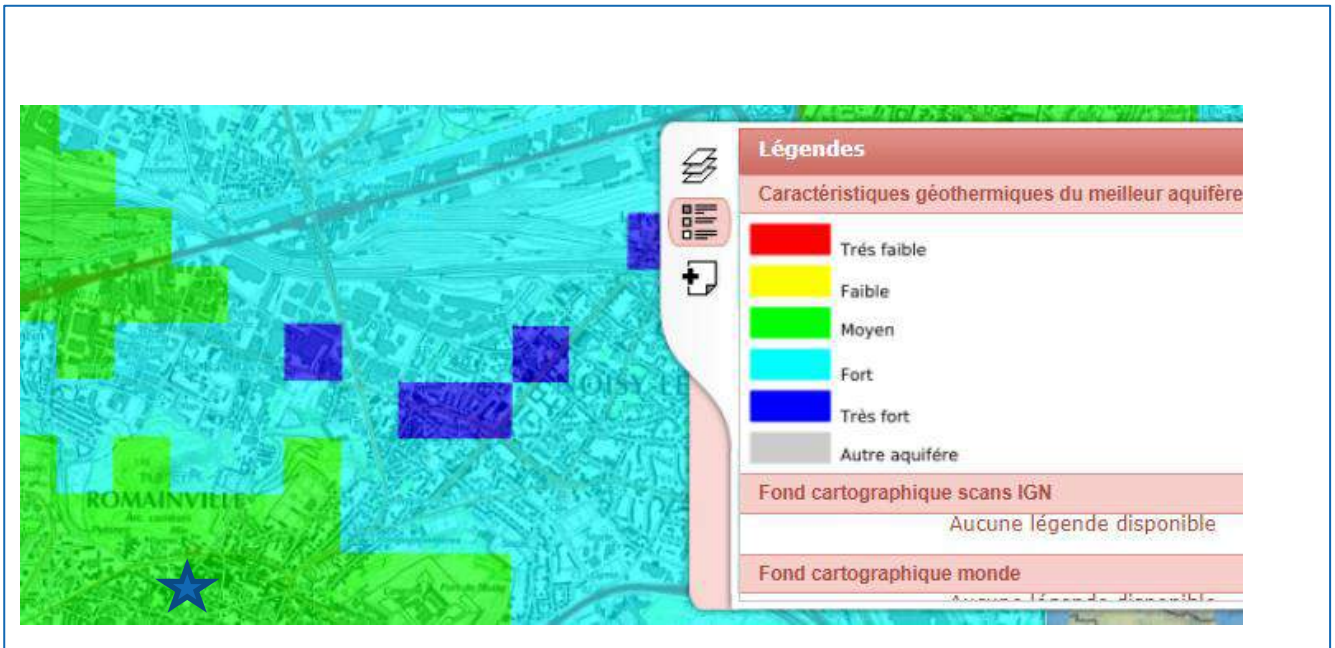


Figure 17 : carte de potentiel géothermique sur nappe (source : BRGM)

La validation du potentiel géothermique sur nappe nécessite toutefois des investigations et recherches plus fines que celles réalisées dans le cadre de l'étude du potentiel ENR.

Conclusion sur la ressource

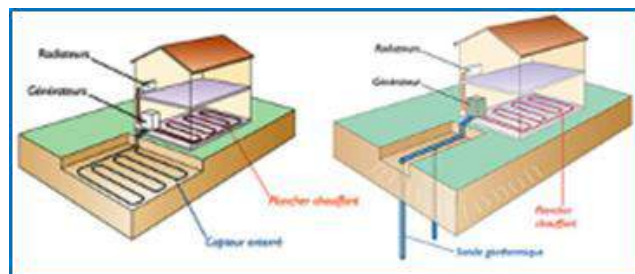
Le potentiel géothermique sur nappe semble important au droit du site mais la taille de l'ilot D3 est insuffisante pour amortir financièrement le coût des forages. Cette solution serait mieux adaptée à une zone d'étude plus vaste (à l'échelle du projet d'aménagement dans son ensemble par exemple).

Solution non retenue pour la suite de l'étude.

4.7.3 La géothermie sur sondes verticales

Il est également possible de recourir à des sondes géothermiques verticales, plus coûteuses généralement, mais qui permettent d'exploiter des contextes géologiques plus perturbés.

Un fluide caloporteur les parcourt et capte la chaleur du sous-sol. Cette énergie est alors valorisée en énergie de chauffage au moyen d'une pompe à chaleur.



► **Productivité des sondes**

S'agissant d'un projet principalement composé de logements, les besoins thermiques sont alors majoritairement des besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Dès lors, l'exploitation du sous-sol se

traduit par un risque de refroidissement de la ressource. Afin d'assurer la pérennité du dispositif, les puissances et quantité d'énergie extraites doivent être limitées, ce qui peut traduire à un surdimensionnement du champ de sondes géothermiques verticales.

Conclusion sur la ressource

La solution de géothermie sur sondes verticales est peu adaptée aux immeubles de logements en collectif.
 Solution non retenue pour la suite de l'étude.

4.8 Récupération de chaleur sur eaux usées

Les eaux usées (issues de nos cuisines, salles de bain, lave-linge etc.) ont une température moyenne comprise entre 10 et 20°C (cette température varie bien sûr en fonction de la région et des saisons). Leur chaleur étant une énergie disponible en quantité importante dans les milieux urbains, une installation de ce type permettrait de réduire les consommations du site.

4.8.1 Installation collective (à l'ilot)

Un échangeur sur un collecteur important (diamètre et longueur) associé à une pompe à chaleur réversible permet de fournir les calories/frigories aux bâtiments afin de les chauffer ou de les refroidir. Bien que l'installation collective permette une mutualisation des coûts, l'investissement reste conséquent et la faible puissance récupérée (de 1 à 1,5 kW/ml équipé) ne justifie généralement un tel investissement que pour des installations ayant une consommation régulière sur l'année (piscine municipale, ou usages mixtes chauds et froids, etc.).

Conclusion sur la ressource

Solution non étudiée

4.8.2 Installation individuelle (au bâtiment)

Un récupérateur de chaleur permet d'utiliser les calories extraites des eaux usées et d'économiser l'énergie sur l'ECS (préchauffe de l'eau de ville). Si les performances annoncées par les constructeurs sont intéressantes (jusqu'à 60% d'économie sur l'ECS), les retours d'expériences sont faibles, tant en ce qui concerne les coûts d'investissement que sur les coûts et contraintes de fonctionnement.

Cette solution pourra toutefois s'envisager en plus de la solution énergétique retenue lors des phases de conception, par exemple dans l'optique d'atteindre des labels de performance supérieurs ou d'optimiser le dimensionnement en puissance des équipements de production.



Conclusion sur la ressource

Solution non étudiée (considérée comme un simple complément car potentiel limité).

4.8.3 Installation individuelle (au logement)

Un récupérateur de chaleur (échangeur) permet d'utiliser les calories évacuées par un système (douche principalement) pour préchauffer l'eau froide qui y parvient.

Les conclusions sont identiques à celles de la solution à l'échelle du bâtiment.

Conclusion sur la ressource

Solution non étudiée.

4.9 L'aérothermie

L'aérothermie consiste à utiliser une pompe à chaleur sur l'air extérieur. Si les investissements sont inférieurs à la géothermie (pas de forage), le coefficient de performance du système est globalement moins bon car la température extérieure atteint des températures plus basses (particulièrement pendant la période de chauffage). Dans les cas extrêmes, le COP (rapport de l'énergie thermique obtenue sur l'énergie électrique dépensée) tend vers 1 et le système s'approche des performances d'un radiateur électrique à convection classique. Le recours à une pompe à chaleur est donc acceptable pour des bâtiments récents et bien isolés ayant des besoins de chauffage réduits dans des zones climatiques plutôt tempérées.

Dans le cas du projet, l'aérothermie est une solution de chauffage qui pourrait convenir aux logements neufs. A noter que les pompes à chaleurs peuvent soit être utilisées pour le chauffage, soit pour le chauffage et l'ECS, soit enfin pour l'ECS seule (on parle dans ce cas de ballon thermodynamique, la pompe à chaleur étant intégrée au ballon d'eau chaude).

L'aérothermie permet également de produire du froid pour climatiser les locaux de commerce et d'activité par exemple.

Conclusion sur la ressource

Solution retenue pour la climatisation des locaux de commerce et d'activité.

4.10 La cogénération

La cogénération ne représente pas en soi une source d'énergie renouvelable au sens strict du terme, mais est plutôt une variante technique d'une chaudière à gaz ou biomasse.

Un système de cogénération est conçu pour produire à la fois de la chaleur et de l'électricité. L'électricité produite permet de combler des besoins électriques locaux (autoconsommation) ou peut être revendue sur le réseau électrique. Une partie de la chaleur de combustion est récupérée pour répondre aux besoins thermiques locaux : chauffage de bâtiments ou procédés industriels. Les équipements de cogénération sont habituellement activés par la combustion de gaz naturel ou de biomasse.

La viabilité financière des systèmes de cogénération est complexe et dépend de l'usage prioritaire qui en est fait. En pratique, l'intérêt n'est vérifié que pour des installations présentant des besoins très constants en chaleur, ce qui ne sera pas le cas du projet.

Conclusion sur la ressource

Solution non étudiée.

4.11 Chaleur fatale industrielle

Il n'existe pas d'industriels sur le site ni à proximité, donc il n'y a pas possibilité de récupérer de la chaleur fatale.

Conclusion sur la ressource

Solution non étudiée.

4.12 Synthèse de l'analyse de potentiel en EnR

Tableau 5 : synthèse de l'analyse du potentiel du site en énergies renouvelables et de récupération

Ressource énergétique		Disponibilité de la ressource	Potentiel de la ressource	Avantages	Inconvénients	Conclusion intermédiaire
Hydraulique		Aucun cours d'eau sur site	Nul			Potentiel nul
Solaire	Thermique	Existante (Surface de panneaux envisageable : 750 m ² maximum en toiture)	Productible annuel = 75 MWh pour 750 m ²	- Energie « gratuite » et sans nuisances - Energie décarbonée en termes de production	- Nécessité d'un système d'appoint - Production et consommation désynchronisées - Consommateur de surfaces en toiture	Potentiel moyen à fort.
	Photovoltaïque		Productible annuel = 105 MWh pour 250 m ²	- Energie « gratuite » et sans nuisances - Energie décarbonée en termes de production	- Concurrence le solaire thermique en termes d'espace	Potentiel moyen à fort.
Eolienne	Grand éolien	Impossible en secteur urbain				Potentiel inexploitable
	Petit éolien	Aléatoire et d'ampleur non significative				Potentiel faible à nul
Biomasse	Bois-énergie	Existante au niveau régional (nécessite fret)	Suffisant au vu des besoins du projet	- Source décarbonée	- Fret conséquent - Emprise foncière importante	Potentiel moyen
	Biogaz	Déchets urbains	Faible			Potentiel inexploitable à l'échelle du site

Ressource énergétique		Disponibilité de la ressource	Potentiel de la ressource	Avantages	Inconvénients	Conclusion intermédiaire
Géothermie	Haute énergie					Potentiel inexploitable à l'échelle du site
	Moyenne énergie					
	Basse énergie					
	Très basse énergie	PAC sur nappe	Présence d'aquifères connus	A priori suffisant, voire excédentaire, à confirmer à l'aide d'études complémentaires	- Source d'énergie peu chère (électricité à haut rendement)	- Investissement conséquent, nécessité d'un appoint - Problématique de nappes polluées
PAC sur sonde		Oui	Suffisant	- Nuisances réduites - Etudes complémentaires nécessaires	- Déséquilibre important entre les besoins de chaud et de froid du projet - Investissement conséquent et nécessité d'un appoint	Potentiel moyen
Aérothermie		Oui (air)	Potentiel suffisant	- Investissements plus faibles que la géothermie	Moins performante que la géothermie	Potentiel moyen à fort.
Réseaux de chaleur/froid	Existant	Pas de réseau à proximité du site				Potentiel nul
	Création	Taille de l'ilot D3 insuffisante. Peut être envisagé à l'échelle de la ZAC de l'horloge				Potentiel nul à l'échelle du site

5. Conclusions intermédiaires : scénarios énergétiques retenus

Au regard de l'analyse des besoins du site, et de l'analyse du potentiel en énergies renouvelables, les scénarios d'approvisionnement suivant ont été retenus :

► Scénario conventionnel « Econv »

Production de chaleur (chauffage et ECS) avec des chaudières au gaz naturel à condensation communes à l'ensemble de l'îlot,

Production de froid par pompe à chaleur aérothermique par local de commerce ou d'activité³

► Scénario « ENR 1 »

Production de chaleur pour l'ECS avec des panneaux solaires thermiques,

Chaudières gaz à condensation communes à l'ensemble de l'îlot pour la production de chaleur (chauffage + appoint ECS),

Production de froid par pompe à chaleur aérothermique par local de commerce ou d'activité

► Scénario « ENR 2 »

Production de chaleur (chauffage et ECS) avec chaudières à biomasse communes à l'ensemble de l'îlot.

Production de froid par pompe à chaleur aérothermique par local de commerce ou d'activité

La pertinence d'installer des panneaux solaires photovoltaïques pourra être étudiée une fois les choix architecturaux arrêtés (et en fonction de l'espace disponible en toiture).

³ A noter que ce scénario conventionnel est un scénario fictif : le recours au gaz seul ne permettrait pas dans les conditions usuelles de construction des bâtiments de respecter la réglementation thermique. Par ailleurs, le recours aux ENR est obligatoire dans le cas de la construction d'un logement individuel

CAHIER 2



6. Dimensionnements techniques

La consommation énergétique seule ne suffit pas à caractériser une installation de production énergétique. Il faut également étudier sa puissance. La puissance d'une installation est sa capacité à dispenser de l'énergie plus ou moins rapidement. Or, les besoins calculés précédemment ne sont pas constants tout au long de l'année. Ils varient en fonction de paramètres climatiques (température extérieure, apports solaires) et d'usage (occupation des bâtiments, utilisation des équipements, etc.)

Pour retrouver cette puissance, les besoins énergétiques déterminés précédemment sont croisés avec des profils de consommation en fonction des usages (chauffage, froid, ECS) et des activités (logements, commerces, etc.). Ces profils de consommations sont construits à partir de données météorologiques et de différents retours d'expérience (campagnes de mesures, simulations thermiques dynamiques). Un exemple de profil annuel est donné dans la figure qui suit :

Nous avons utilisé des profils types de consommation pour mieux appréhender la saisonnalité des besoins en énergie, et les niveaux de puissance à mettre en œuvre. Cette première estimation ne remplace pas les études de dimensionnement à réaliser en phase de conception.

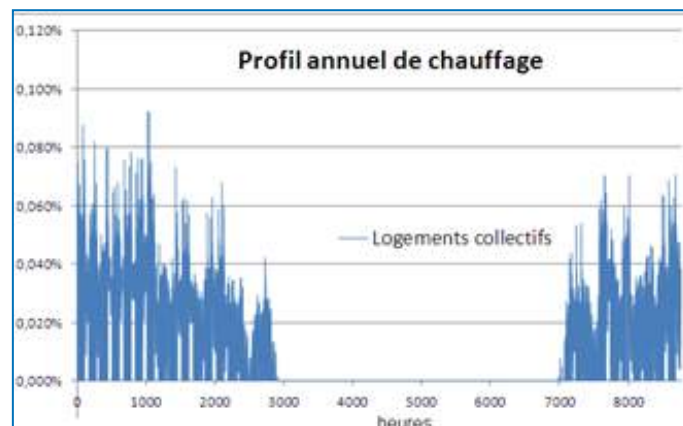


Figure 18 : exemple de profil annuel utilisé

Un outil développé en interne permet d'analyser et de croiser ces profils, afin de construire la monotone de puissance des installations, comme le montre la figure suivante :

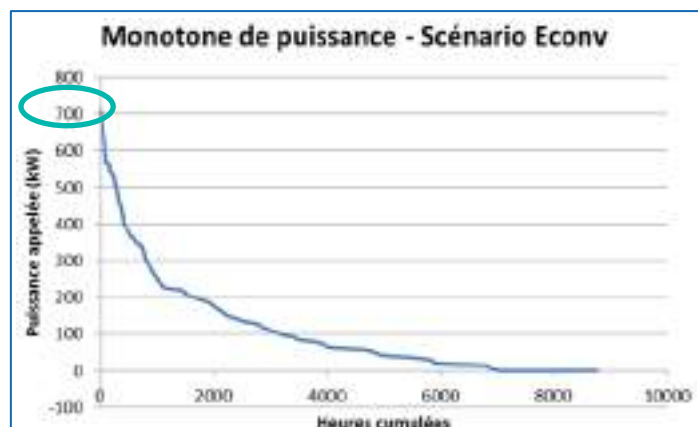


Figure 19 : exemple de répartition annuelle des puissances appelées – chauffage et ECS

Cette monotone doit être vue comme l'analyse du régime de fonctionnement de l'installation au cours de l'année. Dans l'exemple présenté ci-dessus, l'installation fonctionne environ 6 400 heures au cours de l'année.

Cependant, on s'aperçoit que le régime de fonctionnement varie fortement et n'est réellement élevé que durant 1 000 heures environ. Le maximum atteint (ici 700 kW), est la puissance utile à installer.

Pour les 3 scénarios, ces monotones ont été tracées afin de définir les besoins en puissance.

6.1 Scénario Econv

Rappel : le scénario conventionnel Econv consiste à la production de chaleur pour le chauffage et l'ECS grâce à des chaudières à condensation au gaz naturel en pied d'immeuble.

La production de froid est assurée par des pompes à chaleur aérothermiques.

► Production de chaleur

La puissance utile installée, nécessaire pour les usages de chaleur cumulés (chauffage et ECS) des bâtiments du projet, est de 300 kW.

La monotone de puissance du projet est présentée ci-dessous :

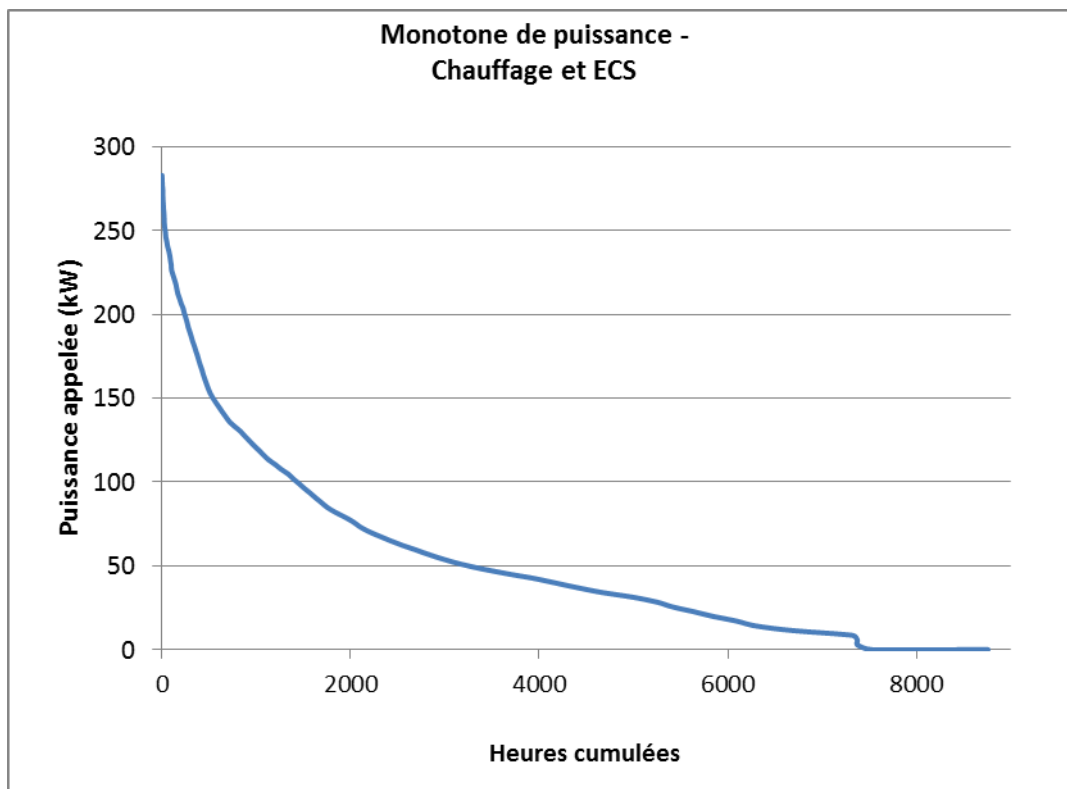


Figure 20 : répartition des puissances appelées (chauffage + ECS) des bâtiments du projet – scénario Econv

► Production de froid

La puissance utile installée, nécessaire pour les usages de froid des bâtiments du projet, est de 25 kW.

La monotone de puissance du projet est présentée ci-dessous :

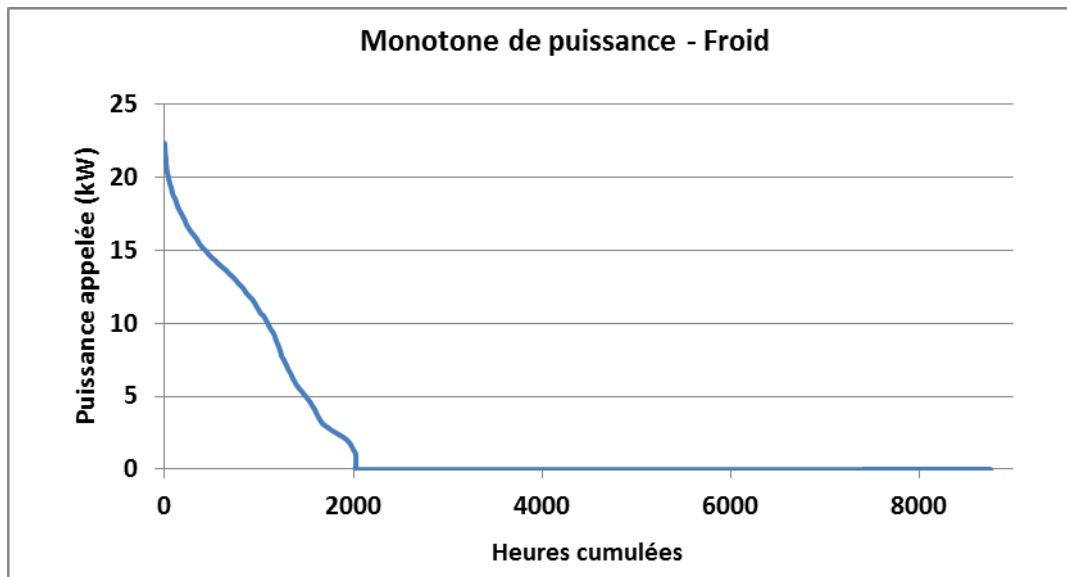


Figure 21 : répartition des puissances appelées (climatisation) des bâtiments du projet – scénario Econv

6.2 Scénario EnR 1

Rappel : ce scénario prévoit la production d'ECS solaire, des chaudières gaz en pied d'immeuble assurant l'appoint en ECS et les besoins de chauffages.

La production de froid est assurée par des pompes à chaleur aérothermiques.

► Production de chaleur

La production d'ECS est assurée en base par des panneaux solaires thermiques : environ **350 m² de panneaux permettent de couvrir environ 60 % des besoins en eau chaude sanitaire**. L'appoint est assuré par des chaudières gaz qui assurent également les besoins de chauffage. La puissance de l'appoint est identique à celle du scénario précédent (300 kW) pour permettre la production de chaleur en tout temps (appoint-secours).

► Production de froid

La puissance utile installée, nécessaire pour les usages de froid des bâtiments du projet, est de 25 kW.

6.3 Scénario EnR 2

Rappel : ce scénario prévoit la production de chaleur (chauffage et ECS) par des chaudières biomasse.

La production de froid est assurée par des pompes à chaleur aérothermiques.

► Production de chaud

La puissance des chaudières biomasse est identique à celle du scénario précédent (300 kW).

► Production de froid

La puissance utile installée, nécessaire pour les usages de froid des bâtiments du projet, est de 25 kW.

7. Analyse multicritère des scénarios retenus

7.1 Coûts d'investissements

La puissance des installations, déterminée précédemment, permet d'estimer les investissements liés. Le tableau ci-dessous présente l'estimation de ces investissements :

Tableau 6 : coûts estimés des équipements de production énergétique *

Scénario	Equipements pris en compte	Investissement en k€ HT	Investissement total en k€ HT
Econv	Achat et installation chaudières gaz à condensation	90 k€HT	113 k€HT
	Achat et installation pompes à chaleur aérothermiques	23 k€HT	
ENR1	Achat et installation chaudières gaz à condensation	90 k€HT	358 k€HT
	Achat et installation des panneaux solaires et des ballons tampons	245 k€HT	
	Achat et installation pompes à chaleur aérothermiques	23 k€HT	
ENR2	Achat et installation chaudières biomasse	250 k€HT	288 k€HT
	Achat et installation pompes à chaleur aérothermiques	23 k€HT	
	Silo	15 k€HT	

Ces estimations sont évidemment des ordres de grandeurs issus de données moyennes et la conception détaillée des dispositifs permettra dans la suite du projet d'affiner ces prévisions économiques. Ils sont donnés à titre indicatif avec une précision de +/- 30%.

7.2 Analyse économique en coût global

Le coût d'investissement seul est une vision très court terme de la problématique énergétique. Pour apprécier le coût réel d'un scénario sur l'ensemble de sa phase de vie, le coût global annualisé des 3 scénarios a été calculé. Il s'agit du coût total sur 20 ans (investissement et fonctionnement) rapporté à l'année.

7.2.1 Hypothèses économiques

Les paramètres suivants sont fixés pour la suite de l'étude :

- Durée d'observation économique : 20 ans
- Part de l'investissement en fond propre : 80 %
- Taux d'intérêt de l'emprunt : 3 %
- Durée de l'emprunt : 10 ans

7.2.2 Evolution des prix de l'énergie

Afin de calculer les dépenses liées aux combustibles, il convient de s'interroger sur l'évolution des prix de l'énergie au cours des 20 prochaines années. Les hypothèses suivantes sont faites pour notre étude :

- Inflation générale : +1,5%/an

- Électricité: +2,3%/an
- Gaz : +4,8%/an
- Biomasse : +2,3%/an

7.2.3 Résultats économiques⁴

Pour rendre l'analyse du coût global annualisé possible, ce dernier est décomposé en 4 parties distinctes :

- P1 : coût du combustible,
- P2 : coûts de maintenance courante,
- P3 : coûts de renouvellement,
- P4.1 : investissement (calculé au chapitre 7.1),
- P4.2 : coût de l'emprunt et autres taxes.

Les résultats de l'analyse sont présentés dans les deux graphiques suivants :

D'après les hypothèses listées, l'analyse en coût global peut se résumer de la façon suivante.

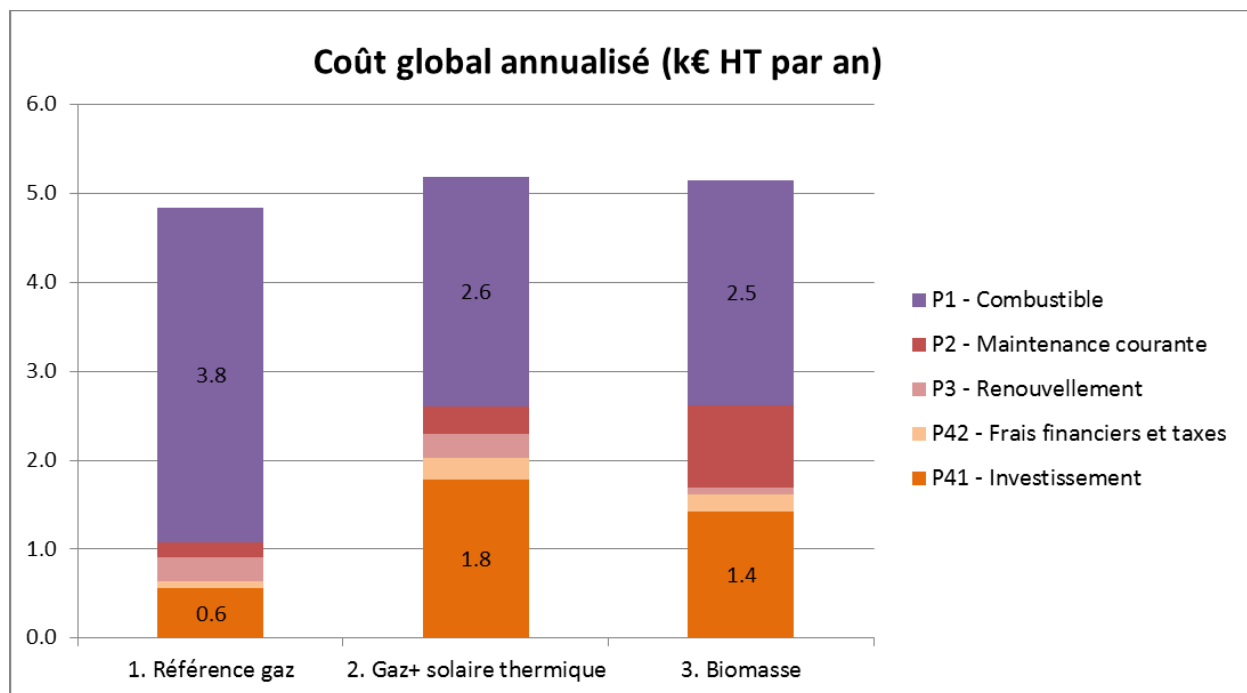


Figure 22 : coût global annualisé des différents scénarios étudiés

Par rapport au scénario de référence (scénario 1), cette analyse a permis de mettre en avant que les solutions EnR ont un coût d'investissement plus élevé (respectivement +220% et +150% pour les scénarios 2 et 3).

Sur une durée d'observation de 20 ans, l'analyse montre que la solution conventionnelle est la moins coûteuse mais les écarts restent modérés avec les solutions EnR. Les surcoûts sur 20 ans sont respectivement de 7% pour le scénario EnR1 et 6% pour le scénario EnR2.

Il faut ajouter à ce constat :

⁴ Le calcul est réalisé « hors externalités » (gestions des terres, enveloppe du bâti, etc.)

- Le contexte du prix du gaz très bas qui avantage effectivement le scénario de référence.
- Le scénario de référence ne fait appel à aucune ENR ce qui est peut rendre impossible l'obtention des labels et certifications envisagés (Effnergie+). Il s'agira alors de les coupler à une installation solaire PV par exemple.

7.2.4 Résultats environnementaux

Les trois scénarios retenus sont comparés sur quatre critères environnementaux : leurs émissions annuelles de gaz à effet de serre, de particules (PM10 et PM2.5) et de déchets radioactifs. Les usages pris en compte dans ce calcul sont la production de chaleur pour le chauffage et l'ECS, ainsi que la production de froid.

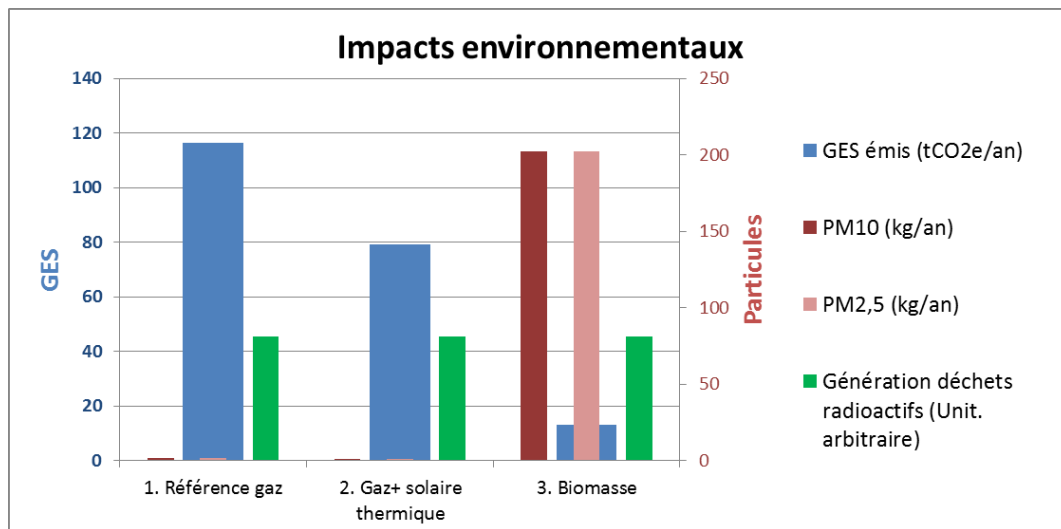


Figure 23 : comparatif environnemental (GES, particules et déchets radioactifs) des scénarios retenus

* Les émissions de GES dues aux fuites de fluide frigorigène des PAC dans les scénarios ne sont pas prises en compte, le taux de fuite et le facteur d'émission variant fortement d'un système à l'autre.

Le scénario Econv est le plus émissif en termes de gaz à effet de serre. Selon ce critère, le scénario ayant le moins d'impact est le scénario EnR2 (-90%), le scénario ENR1 permettant également une réduction de 30%.

En termes d'émissions de particules, le scénario le plus émetteur est le scénario ENR2 car celles-ci sont générées par la combustion de la biomasse.

Les 3 scénarios sont équivalents en termes de génération de déchets radioactifs (usage de l'électricité pour le froid).

8. Autres préconisations

8.1 Conception architecturale

Il est possible de viser un niveau de consommation énergétique plus ambitieux que celui fixé par le cadre réglementaire. Une conception architecturale soignée et le climat doux de la région peuvent permettre d'atteindre des niveaux de chauffage faibles.

8.2 Intégration architecturale

Le scénario EnR1 de la présente étude propose le recours à une installation de panneaux solaires thermiques. Outre l'encombrement évident qu'ils peuvent représenter aux niveaux des toitures, leur intégration architecturale est complexe, et doit donc être prise en considération en amont de la conception.

Le scénario EnR2 propose le recours à une chaudière biomasse. Outre la nécessité de prévoir des surfaces de locaux techniques suffisantes pour y stocker les chaudières et le silo, les conditions de livraison doivent être prévues lors de la conception du plan de masse et des accès.

L'ensemble des scénarios de la présente étude prévoit des pompes à chaleur aérothermiques individuelles qui disposent d'un module extérieur. L'intégration architecturale de ces modules extérieurs doit être soignée et étudiée lors de la conception.

9. Conclusion

L'étude de faisabilité du potentiel de développement en énergies renouvelables du projet d'aménagement de l'ilot D3 de la ZAC de l'horloge située à Romainville, mené par la SCCV HORLOGE GASTON ROUSSEL, s'est déroulée en trois étapes.

Dans un premier temps, la **caractérisation des besoins en énergie** a permis d'estimer les apports en énergie nécessaires au fonctionnement du projet. Ainsi, sur l'ensemble de la zone, **les besoins de chaleur en énergie utile s'élèvent à près de 450 MWh/an**. La répartition de ces besoins au cours de l'année a permis de dimensionner les installations de production énergétique nécessaires.

Dans un deuxième temps, **l'analyse du potentiel en énergies renouvelables** de la zone a permis de dégager l'utilisation des énergies renouvelables et de récupération les plus pertinentes au regard des contraintes du projet. Le recours **au solaire thermique et à la biomasse** ont été identifiés comme pertinents.

- Scénario ENR1 : recours à des panneaux solaires pour l'ECS, chaudières gaz à condensation assurant l'appoint en ECS et les besoins de chauffage. Production de froid avec des pompes à chaleur aérothermiques
- Scénario ENR2 : production de chaleur grâce à des chaudières biomasse. Production de froid avec des pompes à chaleur aérothermiques

Ces deux scénarios ont été comparés avec le scénario conventionnel suivant :

- Scénario Econv : production de chaleur et d'ECS avec chaudière gaz naturel à condensation individuelle au bâtiment et production de froid avec des pompes à chaleur aérothermiques.

Il est à noter que la solution de géothermie sur nappe a été écartée malgré le fort potentiel du site. En effet, la taille de l'ilot D3 est insuffisante pour justifier économiquement une telle solution (besoins énergétiques trop faibles par rapport au potentiel de la ressource). Cette solution, associée à la création d'un réseau de chaleur, serait en revanche pertinente à l'échelle de la ZAC de l'horloge dans son intégralité (à condition que le phasage général de l'aménagement de la ZAC soit compatible).

Enfin, une **analyse économique** a permis de comparer les différents scénarios, en prenant à la fois en compte l'investissement et son financement, mais également les coûts de fonctionnement, tout en intégrant l'évolution des prix de l'énergie.

Par rapport au scénario de référence (scénario 1), cette analyse a permis de mettre en avant que les solutions EnR ont un coût d'investissement plus élevé (respectivement +220% et +150% pour les scénarios 2 et 3).

Sur une durée d'observation de 20 ans, l'analyse montre que la solution conventionnelle est la moins coûteuse mais les écarts restent modérés avec les solutions EnR. Les surcoûts sur 20 ans sont respectivement de 7% pour le scénario EnR1 et 6% pour le scénario EnR2.

Pour compléter la comparaison, les différents **impacts environnementaux** (gaz à effet de serre, émissions de particules fines, et génération de déchets radioactifs) de chaque scénario ont été évalués.

A titre de synthèse, le tableau suivant présente les résultats de la comparaison des scénarios en les classant du plus avantageux (note : 1) au moins avantageux (note : 3) sur les différents critères économiques et environnementaux :

Tableau 7 : synthèse du comparatif des différents scénarios

	Scénario 1 Gaz (réf)	Scénario 2 Gaz+solaire thermique	Scénario 3 Biomasse
Coût global	1	2	2
Investissement	1	3	2
Impact GES	3	2	1
Impact particules	1	1	3
Impact « déchets radioactifs »	1	1	1
Impact « énergie primaire »	2	1	3
Recours à des ENR	3	2	1

L'analyse multicritère a permis de mettre en avant la pertinence du choix d'une solution ENR sur ce projet. Malgré un investissement plus important lors de l'installation, les scénarios ENR présentent de faibles surcoûts économiques sur le long terme (+7% et +6% pour une projection sur 20 ans), en plus d'un impact environnemental réduit de façon non négligeable.

