

CSD INGÉNIEURS SA
Chemin des Semailles 50
CH-1212 Grand-Lancy
+41 22 308 89 00
geneve@csd.ch
www.csd.ch

CSDINGENIEURS+
INGÉNIEUX PAR NATURE

CET 2022-05-V3

14.07.2026

Nautey

PLQ n°30'088 "Chemin Lullin" - Troinex

Concept Energétique Territorial (CET)

Genève, le 07.07.2026 / FCH000810.01

Table des matières

1	Introduction	1
2	Mise en contexte	2
2.1	Bases légales et réglementaires	2
2.2	Périmètre d'étude restreint	3
2.3	Périmètre d'étude élargi	4
3	État des lieux énergétiques	5
3.1	Besoins énergétiques futurs	5
3.1.1	Besoins de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire	5
3.1.2	Besoins de froid	5
3.1.3	Besoins d'électricité	6
3.2	Infrastructures existantes et projetées	6
3.3	Potentiel des ressources énergétiques renouvelables et locales	6
3.3.1	Bois-énergie	6
3.3.2	Solaire	7
3.3.3	Géothermie	8
3.3.3.1	<i>Géothermie faible profondeur</i>	8
3.3.3.2	<i>Géothermie moyenne profondeur</i>	9
3.3.4	Récupération de chaleur sur les eaux usées	9
3.3.5	Air ambiant	9
3.3.6	Stock à changement de phase	10
3.4	Rôle des acteurs concernés	10
4	Proposition et analyse de stratégies énergétiques locales	11
4.1	Stratégie 1 – PAC sur sondes géothermiques verticales + solaire thermique + photovoltaïque	11
4.2	Stratégie 2 – PAC air/eau + solaire photovoltaïque (+ solaire thermique)	12
4.3	Stratégie 3 – Système IceSol + solaire thermique + photovoltaïque	12
4.4	Stratégie 4 – Chaudière bois + solaire thermique + photovoltaïque	13
5	Synthèse des orientations et des recommandations pour les acteurs concernés	14

Liste des figures

Figure 1 : Plan de situation	1
Figure 2 : Plan du projet de PLQ	4
Figure 3 : Localisation du grand consommateur ZAS par rapport au PLQ « Chemin Lullin »	4
Figure 4 : Besoins de chaleur du site en énergie à gauche et en puissance à droite pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire	5
Figure 5 : Besoins d'électricité du site pour les appareils, l'éclairage et la ventilation	6
Figure 6 : Immissions de NO ₂ (moyenne 2013 - 2020) aux alentours du PLQ Chemin Lullin	7

Liste des tableaux

Tableau 1 : Réparation des surfaces selon les bâtiments et les parcelles	3
Tableau 2 : Couverture des besoins de chaleur par des sondes géothermiques faible profondeur	8
Tableau 3 : Tableau de synthèse des acteurs du concept énergétique et de leur rôle	10

Préambule

CSD confirme par la présente avoir exécuté son mandat avec la diligence requise. Les résultats et conclusions sont basés sur l'état actuel des connaissances tel qu'exposé dans le rapport et ont été obtenus conformément aux règles reconnues de la branche.

CSD se fonde sur les prémisses que :

- ♦ le mandant ou les tiers désignés par lui ont fourni des informations et des documents exacts et complets en vue de l'exécution du mandat,
- ♦ les résultats de son travail ne seront pas utilisés de manière partielle,
- ♦ sans avoir été réexaminés, les résultats de son travail ne seront pas utilisés pour un but autre que celui convenu ou pour un autre objet ni transposés à des circonstances modifiées.

Dans la mesure où ces conditions ne seraient pas remplies, CSD déclinera toute responsabilité envers le mandant pour les dommages qui pourraient en résulter.

Si un tiers utilise les résultats du travail ou s'il fonde des décisions sur ceux-ci, CSD décline toute responsabilité pour les dommages directs et indirects qui pourraient en résulter.

1 Introduction

CSD Ingénieurs SA a été mandaté par Opalys Project SA, pilote du projet, pour l'établissement d'un Concept Énergétique Territorial (CET) relatif à l'élaboration du Plan Localisé de Quartier (PLQ n°30'088) « Chemin Lullin ».

Le périmètre du PLQ n°30'088, localisé sur la Figure 1 ci-dessous, recouvre une emprise d'environ 17'400 m² sur le territoire de la commune de Troinex. Il se situe sur les parcelles privées n°10'175 et n°10'176. Il est limité à l'ouest par le Chemin Lullin.

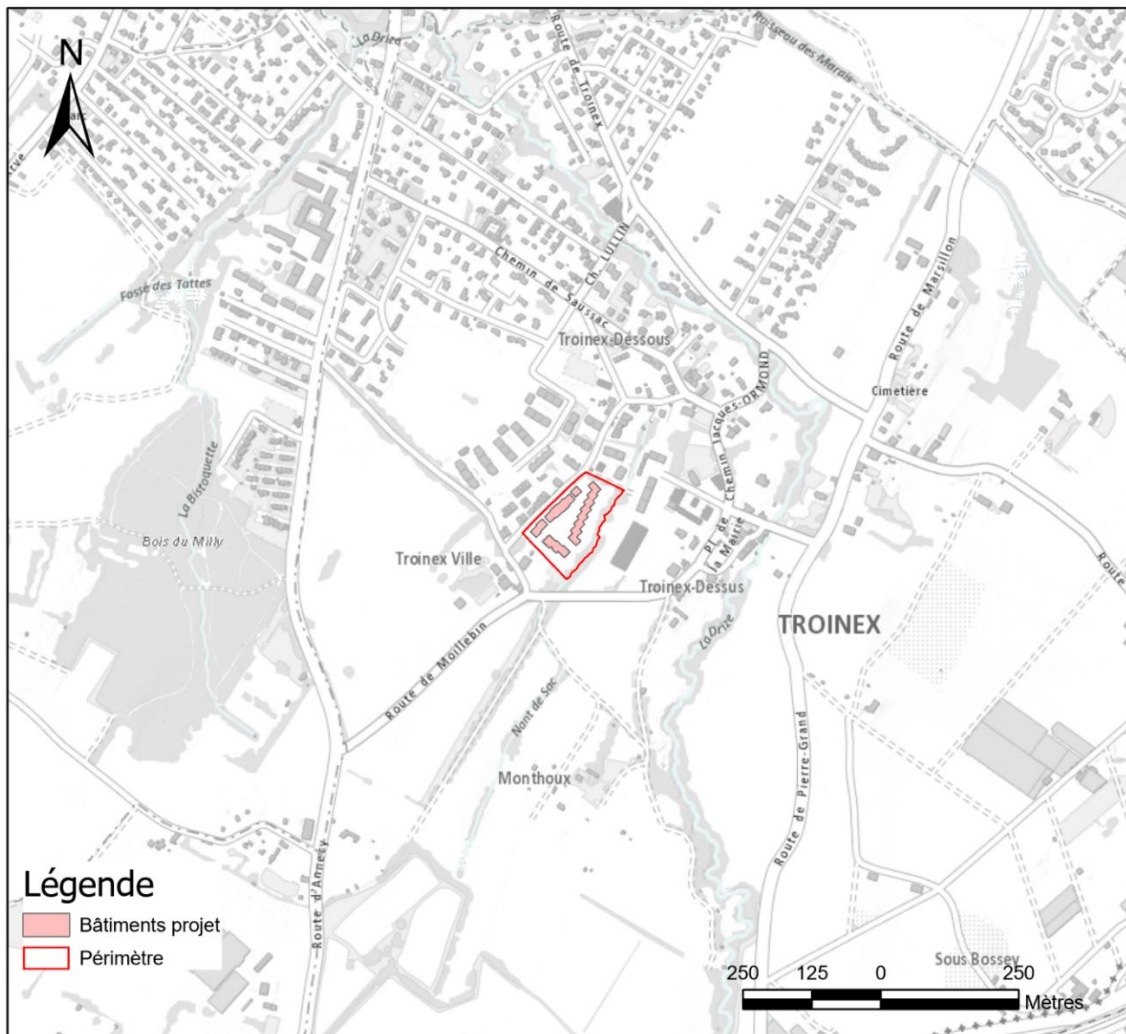


Figure 1 : Plan de situation

L'objectif de ce document est de déterminer les différentes possibilités d'approvisionnement énergétique du PLQ n°30'088 « Chemin Lullin », en favorisant l'utilisation rationnelle de l'énergie et le recours aux énergies renouvelables, tout en considérant les contraintes et opportunités d'un périmètre élargi autour de ce périmètre d'étude.

L'étude proposée vise à répondre aux exigences de l'Office Cantonal de l'Énergie (OCEN) et de la loi cantonale sur l'énergie. Ce CET a pour objectif principal de présenter les différentes stratégies énergétiques qu'il est possible de mettre en œuvre en favorisant le potentiel renouvelable local et les infrastructures de transport (réseaux) d'énergies renouvelables.

2 Mise en contexte

2.1 Bases légales et réglementaires

La politique énergétique du canton de Genève est régie par la loi cantonale sur l'énergie du 7 novembre 1987 (RSG L 2 30 ; LEn) et son règlement d'application du 22 septembre 1988 (RSG L 2 30.01 ; REn). Les exigences relatives à la planification énergétique territoriale sont quant à elles définies dans la Directive relative aux concepts énergétiques territoriaux du 4 août 2010.

Les grandes orientations de la politique énergétique du canton sont définies dans l'art. 1 de la LEn :

« 1. La présente loi a pour but de favoriser un approvisionnement énergétique suffisant, sûr, économique, diversifié et respectueux de l'environnement.

2. Elle détermine les mesures visant notamment à l'utilisation rationnelle et économe de l'énergie et au développement prioritaire de l'exploitation des sources d'énergies renouvelables et indigènes. »

L'article 11, alinéa 2 de la LEn précise le champ d'application des CET :

« En matière d'aménagement du territoire, les plans directeurs de quartier, les plans localisés de quartier, les plans localisés agricoles [...], comportent un concept énergétique territorial. »

Dans ce cadre, la loi exige la mise en œuvre d'une planification énergétique territoriale définie comme suit (art. 6, al. 12) :

« Le concept énergétique territorial est une approche élaborée à l'échelle du territoire ou à celle de l'un de ses découpages qui vise à :

a) organiser les interactions en rapport avec l'environnement entre les acteurs d'un même territoire ou d'un même découpage de ce dernier, notamment entre les acteurs institutionnels, professionnels et économiques ;

b) diminuer les besoins en énergie notamment par la construction de bâtiments répondant à un standard de haute performance énergétique et par la mise en place de technologies efficaces pour la transformation de l'énergie ;

c) développer des infrastructures et des équipements efficaces pour la production et la distribution de l'énergie ;

d) utiliser le potentiel énergétique local renouvelable et les rejets thermiques. »

Ainsi, le PLQ Lullin est assujéti à la mise en œuvre d'un CET, qui fait l'objet du présent rapport et qui se doit de respecter les buts (cités ci-dessus) d'un tel concept.

Par ailleurs, toute nouvelle construction sur le territoire du canton doit au minimum respecter les standards de Haute Performance Énergétique (HPE-neuf). De plus, les constructions des collectivités publiques, des établissements et fondations de droit public et de leurs superficiaires, doivent satisfaire à un standard de Très Haute Performance Énergétique (THPE-2000W).

Au niveau normatif, les exigences légales et les recommandations à respecter en matière d'énergie dans le bâtiment sont constituées notamment par les documents principaux suivants :

Général : MoPEC (2014) « Modèle de prescriptions énergétiques des cantons » ; Cahier technique SIA 2024 « Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment ».

Énergie thermique : Norme SIA 180 « Protection thermique, protection contre l'humidité et climat intérieur dans les bâtiments » ; Norme SIA 380/1 « Besoins de chaleur pour le chauffage » ; Norme SIA 385/2 « Installations d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments – Besoins en eau chaude, exigences globales et dimensionnement ».

Énergie électrique : Norme SIA 380/4 « L'énergie électrique dans le bâtiment » ; Norme SIA 387/4 « Électricité dans les bâtiments – Éclairage : calcul et exigences ».

2.2 Périmètre d'étude restreint

Le PLQ n°30'088 « Chemin Lullin » s'étend sur une surface de 17'400 m² sur les parcelles n°10'175 et n°10'176 de la commune de Troinex. Actuellement, un seul bâtiment existant est présent sur la parcelle n°10'175.

Le programme prévoit la démolition du bâtiment existant et la construction de :

- 2 bâtiments de logements sur la parcelle n°10'175, de gabarits variés et d'une surface brute de plancher (SBP) de 4'142 m² ;
- 3 bâtiments de logements sur la parcelle n°10'176, de gabarits variés et d'une SBP totale de 9'649 m² ;
- Un sous-sol commun sous l'ensemble des bâtiments rassemblant un parking et des caves.

Le Tableau 1 ci-dessous présente la répartition des surfaces en fonction des différents bâtiments.

Répartition des droits à bâtir				Localisation des droits à bâtir				
Parcelle N°	Surface cadastrée en m ²	Surface constructible en m ²	SBP future en m ²	Bât. A	Bât. B	Bât. C	Bât. D	Bât. E
10'175	5056	4'908	4'142				1'094	3'048
10'176	12'344	11'432	9'649	6'668	520	2'461		
Total	17'400	16'340	13'791					

Tableau 1 : Répartition des surfaces selon les bâtiments et les parcelles

Le Maître d'Ouvrage (MO) semble plutôt vouloir viser un standard de Très Haute Performance Énergétique (THPE) pour les futurs bâtiments, tout en considérant les subventions liées à une telle certification, mais également viser une conception architecturale permettant de limiter les besoins en chaud, en éclairage et les surchauffes.

Le plan du projet de PLQ est présenté dans la Figure 2 ci-après.

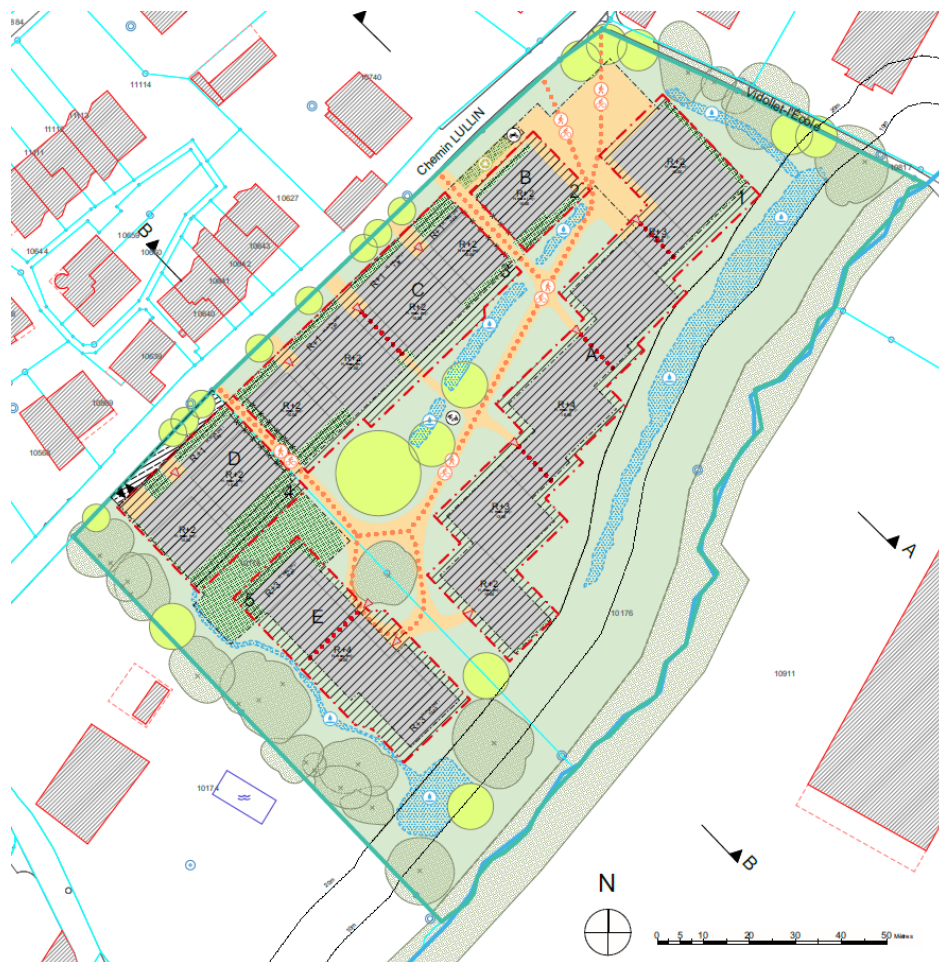


Figure 2 : Plan du projet de PLQ

2.3 Périmètre d'étude élargi

Aucun CET n'a été réalisé à proximité du PLQ n°30'088 « Chemin Lullin ». La commune de Troinex regroupe essentiellement des logements. Aucun grand consommateur n'est présent à proximité immédiate du projet. La Zone Agricole Spéciale (ZAS) de Veyrier – Troinex se situe à quelques kilomètres plus à l'est (Figure 3).

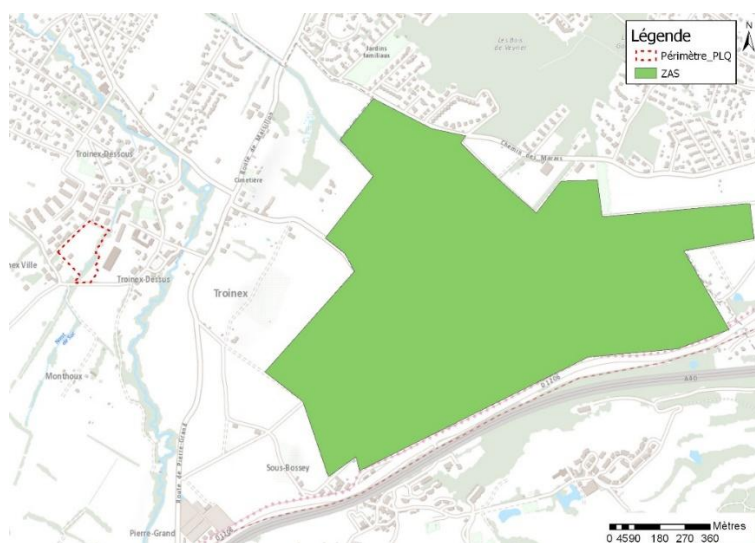


Figure 3 : Localisation du grand consommateur ZAS par rapport au PLQ « Chemin Lullin »

3 État des lieux énergétiques

3.1 Besoins énergétiques futurs

Les besoins énergétiques présentés ci-dessous sont pour l'ensemble du périmètre du PLQ n°30'088.

Les surfaces de référence énergétique (SRE) calculées correspondent à 90% des SBP.

3.1.1 Besoins de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

Le standard énergétique visé pour les nouveaux bâtiments n'étant pas encore défini, nous estimons donc les besoins de chauffage dans une fourchette comprise entre un minimum correspondant aux valeurs cibles de la norme SIA 380/1 (2016) (équivalent THPE) et un maximum correspondant à 80% des valeurs limites de cette même norme (équivalent HPE). Les besoins en eau chaude sanitaire (ECS) restent inchangés quel que soit le standard énergétique retenu. Ces besoins de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire sont présentés dans la Figure 4 ci-après.

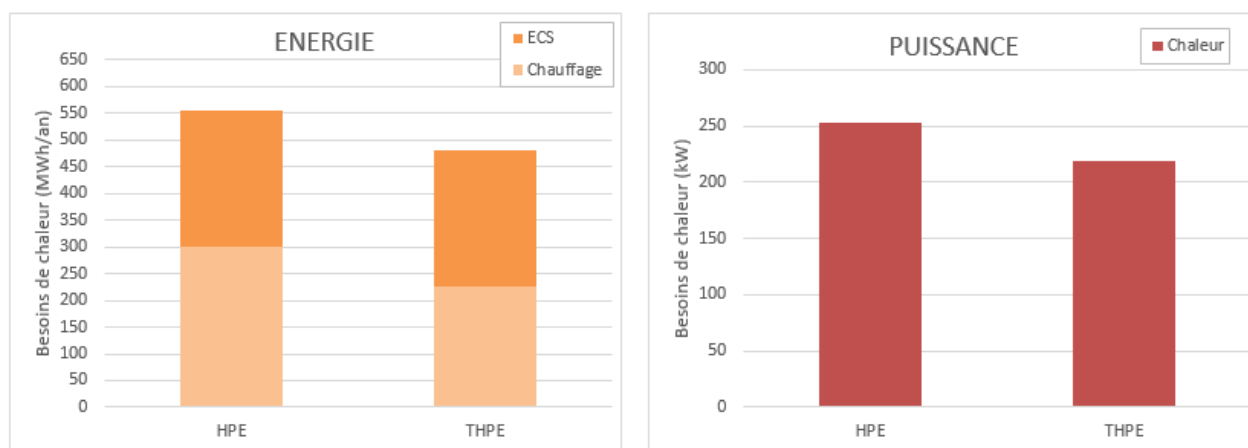


Figure 4 : Besoins de chaleur du site en énergie à gauche et en puissance à droite pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

Pour un standard HPE, les besoins de chaleur des bâtiments du PLQ n°30'088 « Chemin Lullin » s'élèvent à 300 MWh/an pour le chauffage et à 260 MWh/an pour l'eau chaude sanitaire, ce qui correspond à une puissance totale de 250 kW.

Pour un standard THPE, les besoins de chaleur des bâtiments du PLQ s'élèvent à 220 MWh/an pour le chauffage et à 260 MWh/an pour l'eau chaude sanitaire, ce qui correspond à une puissance totale de 220 kW.

3.1.2 Besoins de froid

Les bâtiments de logement n'ont en règle générale pas besoin de froid. Cependant, afin d'éviter tout risque de surchauffe, toutes les mesures possibles devront être prises, notamment :

- Des mesures constructives et techniques applicables en matière de protection contre les surchauffes (respect des normes SIA 180 : édition 2014, 380/1 : édition 2016, 382/1 : édition 2014, surfaces vitrées adaptées, ouverture des fenêtres, protections solaires, inertie thermique, etc.) ;
- Maîtriser les charges thermiques internes pour autant que possible en utilisant des appareils économes en énergie notamment en ce qui concerne l'éclairage, en optimisant l'emplacement des sources importantes de charges internes, etc. ;
- Favoriser le rafraîchissement naturel.

3.1.3 Besoins d'électricité

Les besoins d'électricité du PLQ « Chemin Lullin » devront respecter l'art. 12B, al. 2 let. c REn du règlement d'application de la loi sur l'énergie, qui stipule que : « *les valeurs cibles relatives à la demande globale en énergie définies par la norme SIA 387/4, édition 2017, pour l'éclairage sont respectées pour la ventilation/climatisation et l'éclairage* ».

Les besoins d'électricité pour l'ensemble des bâtiments du site peuvent être estimés à environ 170 MWh/an pour les appareils, 50 MWh/an pour l'éclairage et 15 MWh/an pour la ventilation (Figure 5).

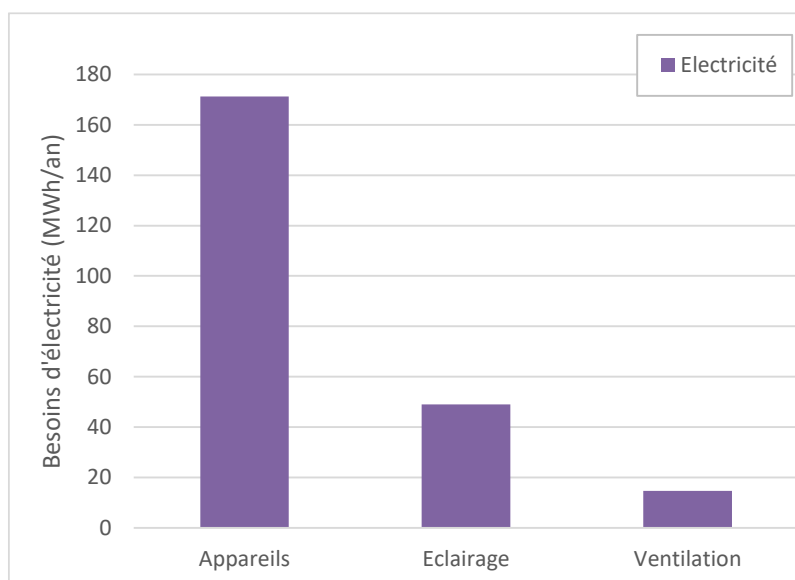


Figure 5 : Besoins d'électricité du site pour les appareils, l'éclairage et la ventilation

3.2 Infrastructures existantes et projetées

Les réseaux de gaz et d'électricité passent à proximité immédiate des parcelles n°10'175 et n°10'176.

En revanche, aucun réseau thermique, de chauffage à distance ou d'énergie n'est présent, ni projeté, à l'intérieur ou à proximité du périmètre.

Pour rappel, aucune infrastructure n'est présente sur la parcelle n°10'176 et le bâtiment existant sur la parcelle n°10'175 va être détruit.

3.3 Potentiel des ressources énergétiques renouvelables et locales

3.3.1 Bois-énergie

Conformément aux conditions de simulations du modèle Cadero (vs 2.2.7) employé par le Service de l'air, du bruit et des rayonnements non-ionisants (SABRA) pour l'évaluation des émissions atmosphériques, la pollution induite sur le périmètre d'étude est évaluée dans un périmètre d'une surface de 1 km² centré sur le projet (maille kilométrique représentative englobant le projet et les principaux axes de circulation sollicités).

Selon les informations transmises par le SABRA, le réseau des capteurs passifs indique une moyenne annuelle des émissions de NO₂ s'élevant à 13 µg/m³ en 2022 sur la maille kilométrique de référence.

La station ROPAG du Foron, située à environ 6.4 km au Nord-Est du périmètre du projet, présente une moyenne annuelle des immissions de NO₂ s'élevant à 14.8 µg/m³.

Le périmètre d'étude se trouve donc dans un secteur qui présente une concentration de NO₂ inférieure à la valeur limite d'immissions de l'OPair, fixée à 30 µg/m³/an (Figure 6).

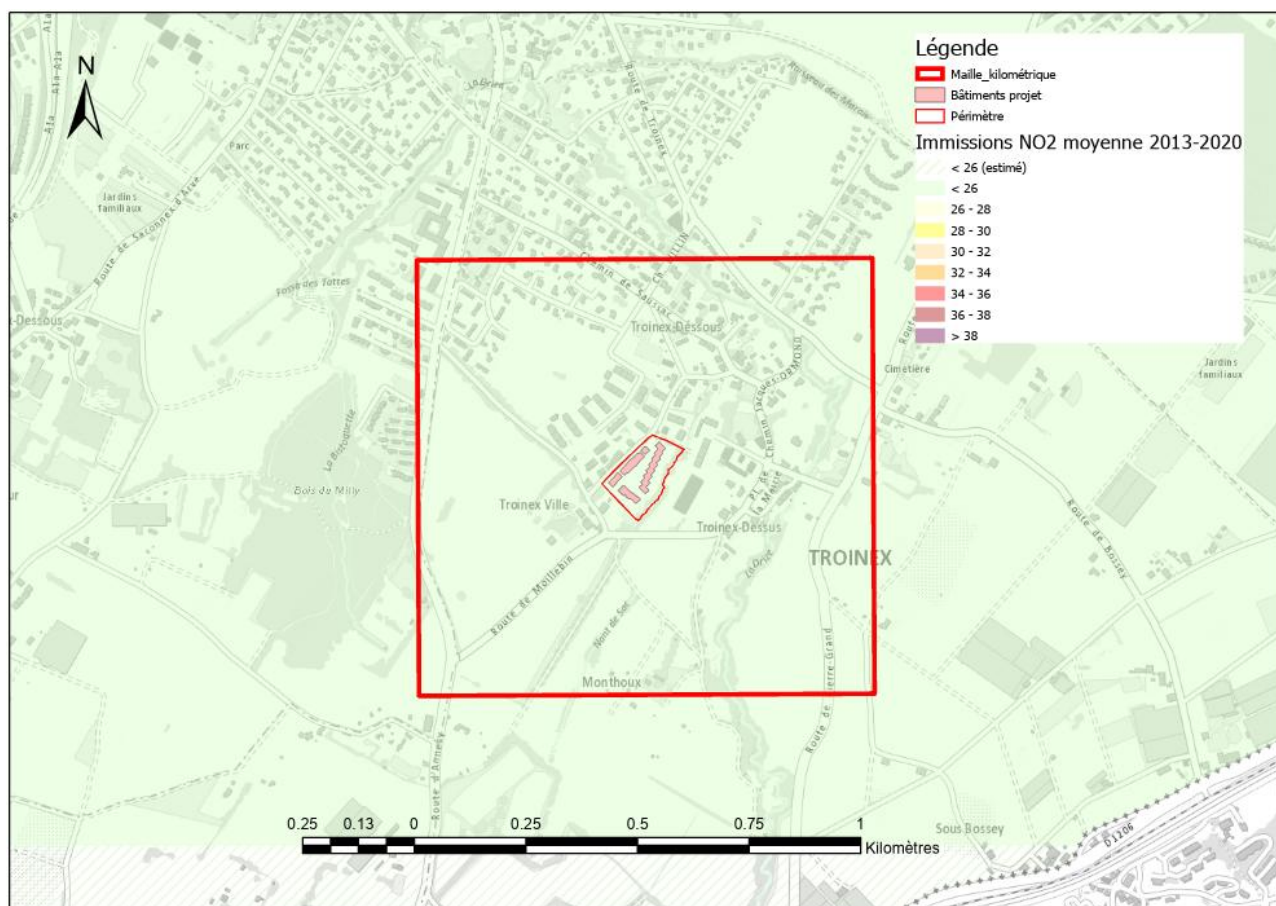


Figure 6 : Immissions de NO₂ (moyenne 2013 - 2020) aux alentours du PLQ Chemin Lullin

Les immissions de poussières en suspension (PM₁₀) sont inférieures à la valeur limite de l'OPair (fixée à 20 µg/m³), avec 15.5 µg/m³ au niveau de la station ROPAG du Foron sur l'année 2022.

Les immissions d'ozone (O₃) relevées par la station ROPAG du Foron, mettent en évidence la non-conformité du site par rapport à la valeur fixée par l'OPair (1 Nb_h > 120 µg/m³) avec 334 dépassements sur l'année 2022.

Le PLQ n°30'088 « Chemin Lullin » présente des valeurs d'immissions de NO₂ et de PM₁₀ inférieures aux valeurs limites fixées par l'OPair. Seules les immissions d'O₃ dépassent la valeur fixée par l'OPair. Le projet pourrait être alimenté énergétiquement par une centrale thermique à base de bois de chauffage, moyennant la mise en place de filtres conséquents et efficaces pour limiter les émissions de polluants atmosphériques.

3.3.2 Solaire

Le potentiel de production d'énergie solaire pour le PLQ n°30'088 « Chemin Lullin » a été évalué sur la base des hypothèses suivantes :

- Installation possible uniquement sur les toitures plates dont la surface brute s'élève à environ 2'620 m² sur la parcelle n°10'176 et à 785 m² sur la parcelle n°10'175.
- Seulement 70% de la surface de toiture est utilisable (encombrement par d'autres infrastructures techniques) ;
- La production de chaleur annuelle moyenne spécifique des panneaux solaires thermiques est de 500 kWh/m² de panneau installé ;
- La production d'électricité annuelle moyenne spécifique des panneaux solaires photovoltaïques est de 200 kWh/m² de panneau installé.

Sur la base de ces hypothèses, et prenant en compte le fait que les panneaux installés sont soit de type thermique, soit de type photovoltaïque, le potentiel solaire thermique maximal s'élève ainsi à 1'190 MWh/an, et le potentiel solaire photovoltaïque maximal s'élève quant à lui à 500 MWh/an.

Il s'agit bien ici du potentiel solaire maximal des toitures. Dans la stratégie d'approvisionnement énergétique mise en œuvre, le solaire devra être valorisé au maximum en tenant compte des autres utilisations des toitures et des alternatives possibles (pose en façades, panneaux hybrides, etc.). À minima, les surfaces considérées comme appropriées au sens de l'article 12N du REn devront être équipées d'installations photovoltaïques. Par ailleurs, dans le cas où une solution de production de chaleur par combustion serait retenue, les bâtiments concernés devront également être dotés d'installations solaires thermiques, conformément aux exigences réglementaires en vigueur.

3.3.3 Géothermie

3.3.3.1 Géothermie faible profondeur

Le périmètre du PLQ « Chemin Lullin » se situe à proximité de la nappe phréatique principale du Genevois qui constitue une ressource en eau de première importance pour l'approvisionnement de l'agglomération genevoise. De ce fait, le périmètre est situé dans la zone de demande de renseignement pour les sondes géothermiques. Toutefois, l'implantation de sondes géothermiques verticales sur le périmètre est une solution intéressante pour répondre aux besoins énergétiques du site. Des échanges avec le GESDEC sont indispensables afin de définir les opportunités et contraintes de cette option.

Afin d'étudier le potentiel de la géothermie faible profondeur pour répondre aux besoins énergétiques des futurs bâtiments, on analyse la surface nécessaire à l'implantation des sondes.

La profondeur des sondes est directement liée au type d'application. Pour du chauffage seul, comme c'est le cas pour le présent PLQ, on privilégiera des sondes de 250 mètres de profondeur. Pour la production de chaleur, cette ressource doit être exploitée avec des pompes à chaleur (PAC) dont le coefficient de performance (COP) peut être estimé en moyenne à 4.

En considérant un espacement de 10 mètres entre chaque sonde, une profondeur de 250 m par sonde et une puissance d'extraction de 30 W/ml en hiver, on obtient les résultats présentés dans le tableau ci-après.

Surface dispo [m ²]	Qté sondes [n]	Longueur [m]	Puiss. soutirable au sol [kW]	Energie soutirable au sol [MWh]	Puissance électrique [kW]	Energie électrique [MWh]	Puissance totale [kW]	Energie totale [MWh]
2'125	27	6'642	199	438	80	175	279	614

Tableau 2 : Couverture des besoins de chaleur par des sondes géothermiques faible profondeur

Environ 27 sondes sont nécessaires à la production de chaleur via une PAC pour couvrir les besoins des futurs bâtiments du PLQ. Une surface de terrain d'environ 2'130 m² (non arborée) doit être trouvée pour l'implantation de ces sondes géothermiques, ce qui semble envisageable au vu de la surface totale du PLQ.

Il est à noter que dans le cas d'utilisation de la géothermie faible profondeur pour le chauffage uniquement, il est important de laisser le sol se recharger des calories qui lui ont été prélevées. Pour cela il est possible de ne pas ou peu utiliser le sol durant l'été afin de laisser ce dernier emmagasiner de la chaleur et ainsi se recharger. L'implantation de capteurs solaires thermiques est alors intéressante car la production d'ECS en été se fait majoritairement par le solaire et les sondes ne sont que peu sollicitées. Le surplus de chaleur produit par les capteurs solaires peut également être injecté dans le sol.

Attention, il s'agit ici d'une pré-estimation des besoins. En cas de réalisation concrète d'un champ de sondes géothermiques, l'élaboration d'une simulation dynamique est fortement recommandée afin de définir le nombre de sondes exact et l'espacement minimal nécessaire entre ces dernières, selon la version définitive du projet, dans le but de ne pas compromettre la pérennité du terrain.

3.3.3.2 Géothermie moyenne profondeur

Le programme GEothermies a été engagé par le Canton de Genève et SIG afin de disposer des connaissances du sous-sol genevois nécessaires à la mise en œuvre opérationnelle de la géothermie moyenne profondeur, puis de grande profondeur le cas échéant. Le but de ce programme est de pouvoir définir les secteurs du Canton les plus favorables à l'exploitation de cette ressource et envisager l'exploitation de la géothermie moyenne profondeur (700-1'800 mètres) sur quelques sites sélectionnés.

La zone de Veyrier / Troinex est un vecteur d'investigation prioritaire, en lien avec les conditions géologiques présumées et la zone agricole spéciale. Les récents résultats de la campagne de géophysique en 3D confirment la présence en profondeur d'une zone de faille potentiellement intéressante pour la géothermie. Sur cette base, un avant-projet de forage sera développé. En cas de découverte de ressources, la valorisation de cette zone devrait se faire sur un périmètre plus large que celui du PLQ n°30'088, et les ressources seraient essentiellement destinées à la zone maraîchère et potentiellement aux secteurs adjacents. L'exploitation de la ressource géothermique moyenne ou grande profondeur ne constitue donc pas une option à considérer pour le projet dans l'immédiat.

3.3.4 Récupération de chaleur sur les eaux usées

Il existe deux types de systèmes de récupération de chaleur sur les eaux usées : l'un avec l'échangeur de chaleur dans le collecteur, l'autre avec l'échangeur de chaleur dans une fosse.

Le premier concept nécessite un diamètre de collecteur d'au moins 80 cm et un débit minimum de 15 l/s. Ces valeurs ne sont atteintes qu'à partir de 5'000 à 8'000 habitants. Ce système n'est donc pas adapté au périmètre du PLQ « Chemin Lullin ».

Le second système est plus flexible et peut s'adapter à un plus grand nombre de projet. La température moyenne des eaux usées en sortie de bâtiment est d'environ 25°C. La durée moyenne de fonctionnement de ce type d'installation est une quinzaine d'heures journalières et l'extraction de chaleur maximale engendre un delta de température d'environ 15°C.

Sur cette base, nous estimons que l'extraction de chaleur sur les eaux usées s'élèverait à environ 190 MWh/an, valorisable par une PAC à hauteur de 230 MWh/an, soit une puissance de seulement 40 kW.

Cette solution ne permettrait donc pas de répondre à elle seule aux besoins de chaleur du site. Un système bivalent est indispensable, multipliant ainsi les investissements, les coûts de maintenance, etc. Cette solution n'est donc pas retenue pour l'approvisionnement du projet.

3.3.5 Air ambiant

L'air extérieur représente une ressource thermique accessible présentant peu de contraintes au niveau des infrastructures à mettre en place et des aspects réglementaires à considérer. En effet, l'exploitation de la chaleur de l'air ambiant peut être réalisée par la mise en place de pompes à chaleur, constituées d'une prise d'air extérieur sur laquelle un échangeur thermique extrait une partie de la chaleur ambiante et la transmet dans le bâtiment à chauffer. Du point de vue théorique, le potentiel thermique de l'air extérieur est infini. En pratique, il est limité par les paramètres suivants :

- La diminution drastique du coefficient de performance des pompes à chaleur ainsi que les problèmes de givre des installations lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à 5°C ;
- Les possibilités d'implantation des unités extérieures d'un point de vue esthétique et des nuisances sonores ;
- Cette source de chaleur étant disponible partout, il n'est pas rationnel de réaliser de grandes infrastructures centralisées connectées à un réseau de chauffage à distance. Par conséquent, l'évaluation du potentiel doit être effectuée en relation avec les besoins de chaleur au droit de chaque bâtiment du périmètre étudié.

Sur cette base, il est tout à fait envisageable de répondre aux besoins énergétiques du site via des pompes à chaleur sur air haute performance.

3.3.6 Stock à changement de phase

La technologie du stock à changement de phase, également appelé système « IceSol », est composée d'une pompe à chaleur, d'un stock de glace et de capteurs solaires thermiques sélectifs non vitrés. Ces capteurs solaires sont utilisés comme un échangeur de chaleur durant l'année entière et pas seulement lors de l'ensoleillement. Ils sont utilisés soit pour la production d'énergie solaire en direct, soit pour réchauffer le stock à changement de phase. La pompe à chaleur va puiser son énergie dans l'accumulateur de glace et ainsi augmenter son rendement.

Dans le contexte du PLQ n°30'088 « Chemin Lullin », les besoins de chaleur calculés précédemment nous permettent de pré-estimer les infrastructures nécessaires à la couverture de ces derniers. Avec un stock de glace de 42 m³, qui peut être enterré ou dans un local spécial, et environ 1'120 m² de capteurs solaires thermiques en toiture, soit environ 55% de la surface totale de toiture, il serait possible de couvrir la totalité des besoins de chaleur du site. Toutefois, un appoint/secours par une chaudière gaz est nécessaire pour ce type de système.

3.4 Rôle des acteurs concernés

Le Tableau 3 ci-après présente une synthèse des principaux acteurs concernés dans le projet et leurs rôles.

Acteur	Rôle général pour la concrétisation du projet	Rôle particulier quant au CET et sa concrétisation
Communauté de maîtres d'ouvrage (propriétaires des parcelles)	Investisseurs du projet	Pilotage de la conception et de la mise en œuvre des infrastructures nécessaires. Définition de la structure opérationnelle du projet.
Architectes ACAU et Face-à-Face	Auteurs du projet	Intégration des infrastructures énergétiques nécessaires au projet.
État de Genève – DT – OCEN	Intégration adéquate des enjeux énergétiques dans les orientations générales et pesées d'intérêt	Validation du CET. Coordination et facilitation dans la mise en œuvre de solutions nécessitant la coordination avec des acteurs externes.
Commune de Troinex	Accompagnement du projet urbain, préavis dans le cadre des requêtes en autorisation	Coordination entre aménagement urbain et mise en œuvre des infrastructures énergétiques.
Gestionnaire réseau/contracteur	Gestion potentielle des infrastructures énergétiques	Conception détaillée, réalisation et exploitation des infrastructures sur mandat des investisseurs

Tableau 3 : Tableau de synthèse des acteurs du concept énergétique et de leur rôle

4 Proposition et analyse de stratégies énergétiques locales

En vue d'une valorisation optimale des ressources énergétiques locales à disposition pour le PLQ n°30'088 « Chemin Lullin », les principes suivants doivent être appliqués :

- Dans la mesure où cela est économiquement réalisable, les ressources renouvelables locales doivent être exploitées au maximum en tenant compte de leurs limites et conflits d'usage ;
- L'accès aux ressources locales doit être garanti pour une valorisation future : les irréversibilités doivent être évitées ;
- Les ressources non renouvelables ne doivent être utilisées qu'en dernière priorité, notamment comme énergie d'appoint ou de transition.

Au vu des éléments présentés auparavant, les quatre stratégies suivantes peuvent être envisagées pour le PLQ « Chemin Lullin » :

- **Stratégie 1 – PAC sur sondes géothermiques verticales + solaire thermique + photovoltaïque**
- **Stratégie 2 – PAC air/eau + solaire photovoltaïque (+ solaire thermique)**
- **Stratégie 3 – Système IceSol + solaire thermique + photovoltaïque**
- **Stratégie 4 – Chaudière bois + solaire thermique + photovoltaïque**

Ces quatre stratégies vont être détaillées dans les paragraphes suivants.

4.1 Stratégie 1 – PAC sur sondes géothermiques verticales + solaire thermique + photovoltaïque

La première stratégie envisageable pour répondre aux besoins de chaleur du site est la mise en place de pompes à chaleur sur sondes géothermiques.

Environ 27 sondes sont nécessaires à la production de chaleur via une PAC pour couvrir les besoins des futurs bâtiments du PLQ. Une surface de terrain d'environ 2'130 m² doit être trouvée pour l'implantation de ces sondes géothermiques. Il est préférable de placer ces dernières en dehors de l'emprise des bâtiments pour des raisons de facilité de mise en œuvre lors de la phase travaux mais également de l'accessibilité de ces dernières en cas de maintenance. Cela entraîne une contrainte paysagère sur le projet car il n'est pas possible de planter d'arbres au niveau des sondes géothermiques. Toutefois, il peut également être envisagé de placer les sondes sous le radier du bâtiment, impliquant alors un besoin fort de coordination lors des travaux de terrassement et de génie-civil et une anticipation des travaux pour les forages et le raccordement des sondes. Afin de parer à toute éventualité, il peut être nécessaire de prévoir des trappes d'accès aux sondes.

À savoir que plusieurs géométries sont possibles pour l'implantation des sondes, en ligne, en L, en plusieurs sous-champs, etc. Les choix techniques définitifs concernant cette stratégie seront effectués par les porteurs de projet pendant les phases ultérieures de développement. Dans tous les cas, la réalisation d'une simulation dynamique est fortement recommandée avant la réalisation des champs de sondes. Des échanges avec le GESDEC sont également indispensables afin de s'assurer que cette stratégie est viable.

Dans le cas de la mise en œuvre de cette option, une valorisation maximale des toitures peut être réalisée avec l'installation combinée de capteurs solaires thermiques et de panneaux photovoltaïques. L'installation de panneaux photovoltaïque est obligatoire. Les capteurs solaires thermiques pourraient quant à eux permettre une utilisation moindre des pompes à chaleur et des calories du sol en été. Ces derniers pourraient être dimensionnés afin de répondre au mieux au besoin de recharge du sol pour une exploitation durable de la ressource géothermique.

Les avantages de cette option sont les suivants :

- c'est une technologie connue et maîtrisée ;
- elle est facile à mettre en œuvre et à exploiter ;
- très bonnes performances.

Les inconvénients de cette option sont les suivants :

- surfaces nécessaires à l'implantation des sondes ;
- mise en œuvre complexifiée si sondes en-dessous des bâtiments.

4.2 Stratégie 2 – PAC air/eau + solaire photovoltaïque (+ solaire thermique)

La seconde stratégie envisageable pour répondre aux besoins de chaleur du site est la mise en place de pompes à chaleur air/eau. Comme vu précédemment, cette option serait décentralisée avec une PAC par bâtiment. Ces PAC peuvent être disposées soit en toiture, soit en sous-sol avec une prise d'air extérieure.

Dans le cas de la mise en œuvre de cette option, une valorisation maximale des toitures peut être réalisée avec l'installation de panneaux photovoltaïques permettant de compenser en partie la consommation électrique des PAC. Des capteurs solaires thermiques peuvent également être envisagés afin de recourir à une utilisation moindre des pompes à chaleur en été.

Les avantages de cette option sont les suivants :

- c'est une technologie connue et maîtrisée ;
- elle est facile à mettre en œuvre et à exploiter ;
- grande flexibilité au niveau du phasage.

Les inconvénients de cette option sont les suivants :

- nécessite des mesures de protection contre le bruit et/ou un choix d'équipements silencieux ;
- l'intégration paysagère doit être prise en compte ;
- performances moyennes, COP d'environ 2.2 pour l'ECS et de 3.2 pour le chauffage, soit un COP maximum de 3 en moyenne sur l'année.

4.3 Stratégie 3 – Système IceSol + solaire thermique + photovoltaïque

La troisième stratégie envisageable pour répondre aux besoins de chaleur du site est le système IceSol ou stock à changement de phase. Ce système est composé d'une pompe à chaleur, d'un stock de glace et de capteurs solaires thermiques sélectifs non vitrés. Ces capteurs solaires sont utilisés comme un échangeur de chaleur durant l'année entière et pas seulement lorsque le soleil brille. Ils sont utilisés soit pour la production d'énergie solaire en direct, soit pour réchauffer le stock à changement de phase. La pompe à chaleur va puiser son énergie dans l'accumulateur de glace et ainsi augmenter son rendement.

Dans le contexte du PLQ « Chemin Lullin », la solution optimale au vu du phasage du projet serait de prévoir deux productions de chaleur distinctes, l'une pour la parcelle n°10'175 et l'autre pour la parcelle n°10'176, ce que cette stratégie permet de réaliser. Ainsi, pour la parcelle n°10'176, une pré-estimation des infrastructures nous indique qu'un stock de 30 m³ et que 790 m² de capteurs solaires suffiraient à couvrir les besoins de chaleur de la parcelle. Le stock de glace peut être enterré et une centrale technique commune à tous les bâtiments est nécessaire. Les capteurs solaires thermiques occuperaient environ 50% de la surface totale de toiture. La place restante permettrait l'installation de panneaux photovoltaïques.

Pour la parcelle n°10'175, un stock de 12 m³ et 330 m² de capteurs solaires thermiques suffiraient à couvrir les besoins de chaleur de la parcelle. Là encore le stock de glace peut être enterré et une centrale technique

commune à tous les bâtiments est nécessaire. Les capteurs solaires thermiques occuperaient environ 70% de la surface totale de toiture. La place restante permettrait l'installation de panneaux photovoltaïques.

Les avantages de cette option sont les suivants :

- solution silencieuse et discrète ;
- bonnes performances, COP annuel moyen élevé (environ 5 – 6) et stable ;
- flexibilité au niveau du phasage.

Les inconvénients de cette option sont les suivants :

- c'est une technologie innovante avec peu de retours d'expériences ;
- appoint/secours gaz à priori nécessaire.

4.4 Stratégie 4 – Chaudière bois + solaire thermique + photovoltaïque

La quatrième et dernière stratégie envisageable pour répondre aux besoins de chaleur du site est l'installation d'une chaudière bois centralisée avec la réalisation d'un mini réseau de chaleur à l'échelle du PLQ.

Dans le cas de la mise en œuvre de cette option, une valorisation maximale des toitures doit être réalisée avec l'installation combinée de capteurs solaires thermiques et de panneaux photovoltaïques. En effet, les capteurs solaires thermiques permettent une diminution de l'utilisation de la chaudière en été et est obligatoire dans le cadre d'une installation de production de chaleur à combustion.

Les avantages de cette option sont les suivants :

- c'est une technologie connue et maîtrisée ;
- une chaudière bois produit de la haute température, elle pourrait ainsi permettre à plus ou moins long terme, d'alimenter le bâti existant à proximité du PLQ et ainsi participer à la transition énergétique de la commune. ;

Les inconvénients de cette option sont les suivants :

- émissions de polluants, plus ou moins maîtrisables par des dispositifs de traitement ;
- production haute température alors que les bâtiments du PLQ ont besoin de basse température ;
- nécessite de prévoir un espace pour une chaufferie centralisée, facilement accessible aux camions pour les recharges de pellets ;
- approvisionnement en pellets régulier, environ 5 camions sur l'année, plus fréquents en hiver qu'en été ;
- distance potentiellement importante pour l'approvisionnement en matière première ;
- non adaptable aux différents horizons de construction. La chaudière serait surdimensionnée dans un premier temps en attendant la construction des bâtiments de la parcelle n°10'175 ;
- risque de forte exposition aux législations futures (taxes, exigences).

5 Synthèse des orientations et des recommandations pour les acteurs concernés

Les nouveaux bâtiments qui verront le jour au sein du périmètre du PLQ n°30'088 « Chemin Lullin » ont pour cible le standard THPE. Ils présenteront ainsi une excellente qualité d'enveloppe thermique. De plus, leurs besoins énergétiques devront être couverts avec une importante part d'énergies renouvelables.

Le présent rapport a permis d'évaluer les besoins énergétiques futurs du PLQ, et de mettre en évidence les éléments déterminants du contexte territorial du projet dans le cadre de son approvisionnement énergétique futur. Sur cette base, quatre stratégies énergétiques pouvant potentiellement être mises en œuvre pour l'approvisionnement du site ont été identifiées et sont rappelées ci-dessous :

- **Stratégie 1 – PAC sur sondes géothermiques verticales + solaire thermique + photovoltaïque**
- **Stratégie 2 – PAC air/eau + solaire photovoltaïque (+ solaire thermique)**
- **Stratégie 3 – Système IceSol + solaire thermique + photovoltaïque**
- **Stratégie 4 – Chaudière bois + solaire thermique + photovoltaïque**

La stratégie 1, PAC sur sondes géothermiques avec valorisation maximale de l'énergie solaire est identifiée comme la stratégie thermique à privilégier pour le PLQ, sous-réserve de validation par le GESDEC.

La stratégie 2, PACs air/eau décentralisées est également intéressante, notamment d'un point de vue financier, mais elle présente des performances moins bonnes que la stratégie 1.

La stratégie 3 ne présente pas de contrainte rédhibitoire identifiée à ce stade. Néanmoins, en comparaison avec les deux premières stratégies, elle s'appuie sur un système plus complexe et moins répandu, sans apporter de bénéfice énergétique ou économique déterminant pour le projet. Cette stratégie apparaît donc comme solution moins adaptée aux enjeux du PLQ.

La stratégie 4, une chaudière bois centralisée, présente plus d'inconvénients que d'avantages. Elle n'est donc pas la solution à mettre en œuvre en priorité.

D'un point de vue du financement, la stratégie 2 décentralisée se ferait plutôt via des fonds privés. Les stratégies 1, 3 et 4, centralisées, pourrait éventuellement se réaliser dans le cadre d'un contracting énergétique, qui consiste à confier tous les aspects techniques et financiers à un prestataire global, contre un prix garanti sur la durée du contrat.

Quelle que soit la stratégie choisie, il est impératif de prévoir des prises en attente pour un potentiel futur raccordement en cas de l'arrivée prochaine d'un réseau de chaleur à distance (notamment dans le cadre du programme GEothermies).

Par ailleurs, la valorisation de l'énergie solaire est l'un des éléments importants à mettre en œuvre lors de la construction d'un bâtiment. En plus d'être une ressource illimitée et gratuite, la valorisation du solaire est également exigée par la loi. Quel que soit le standard énergétique retenu, la valorisation de l'énergie solaire doit être maximale. Pour cela, des réflexions architecturales doivent être menées afin d'être ambitieux quant à la valorisation de cette ressource renouvelable.

Afin de maximiser l'autoconsommation de l'électricité produite sur le périmètre du PLQ, il serait tout à fait envisageable de mettre en place une communauté d'autoconsommation ou un regroupement dans le cadre de la consommation propre, qui permet à plusieurs consommateurs de se regrouper afin d'autoconsommer collectivement l'énergie produite par une même installation. Ce regroupement doit être anticipé dès que possible afin de respecter les modalités de raccordement y relatif. D'un point de vue du financement, un tel regroupement peut être mis en place directement par les propriétaires des bâtiments ou alors dans le cadre d'un

contracting énergétique, qui consiste à confier tous les aspects techniques et financiers à un prestataire global, contre un prix garanti sur la durée du contrat.

L'élaboration de la solution technique finale devra être effectuée en tenant compte des besoins mis à jour en fonction des surfaces définitives, des contraintes techniques du projet, du planning prévisionnel et des aspects financiers (coûts, subventions). Il est conseillé au porteur du projet de prendre le plus rapidement possible contact avec le GESDEC qui pourra émettre certaines conditions quant à la réalisation du champ de sondes.

Le canton sera consulté de manière adéquate dans la phase initiale de définition du périmètre, des entités associées au projet et des mesures prévisionnelles à intégrer, afin de permettre le développement rationnel ultérieur de ces installations.

CSD INGÉNIEURS SA

A blue ink signature, appearing to read 'Gouneaud', written in a cursive style.

pp. Nicolas Gouneaud

A black ink signature, appearing to read 'Veyrat', written in a cursive style.

e.r Sandrine Veyrat

Genève, le 07.07.2026