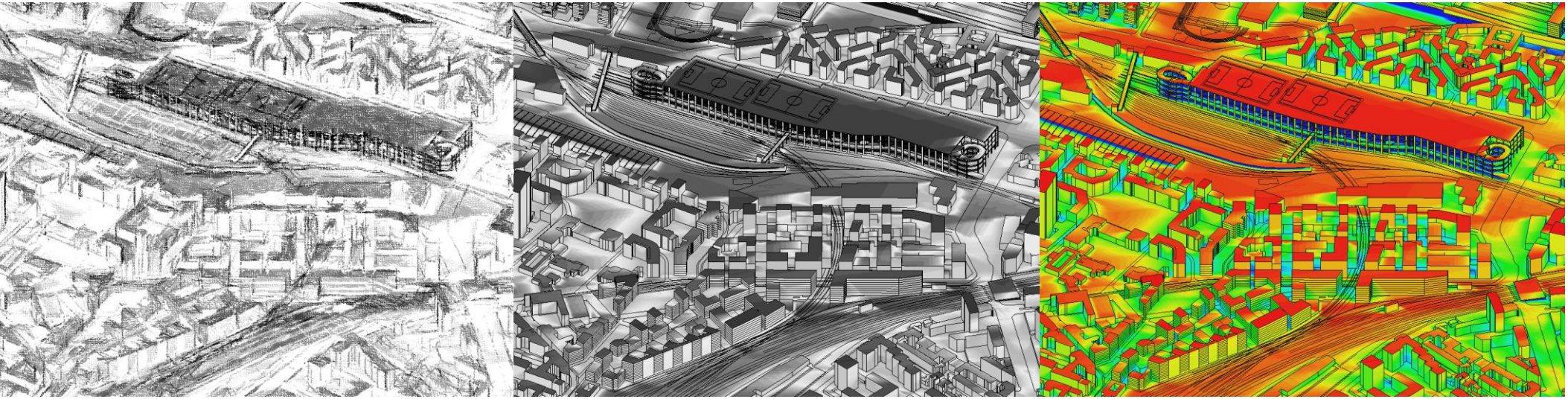
STRATEGIE ENERGETIQUE – PHASE DIAGNOSTIC

ZAC CHAPELLE CHARBON, PARIS XVIIIE



Réf : 2016.715-E01 D 18/07/2017

Rédigé par : Maxime Pirot

Vérifié par : Jonathan Coulet

Vizea marque de LesEnR, SARL au capital de 56 000 euros - 492 275 631 RCS de Nanterre
73, avenue Pierre Larousse – 92 240 Malakoff - Tel : 01 57 19 50 06 - contact@vizea.fr – www.vizea.fr

SOMMAIRE

1. ANALYSE DU CONTEXTE 4

1.1. Introduction 4
1.2. Le projet Chapelle Charbon 4
1.3. Le territoire Paris Nord Est en développement 5
1.4. Plan Climat 5
1.5. Analyse du bioclimatisme 6

2. BESOINS ENERGETIQUES ET ORIENTATIONS 8

2.1. Performance énergétique 8
2.2. Besoins énergétiques 8
2.3. Enjeu de l'impact de la construction 9

3. RESSOURCES ENERGETIQUES 10

3.1. Réseau de chaleur 10
3.2. Energie solaire 11
3.3. Géothermie 13
3.4. Energies de récupération 16
3.5. Bois énergie 18
3.6. Synthèse 19

4. SOLUTIONS INNOVANTES 20

4.1. Réseau de chaleur solaire avec stockage thermique intersaisonnier 20
4.2. Power-to-gas 22

5. STRATEGIES ENERGETIQUES POSSIBLES 24

6. ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE DES SCENARIOS ENERGETIQUES 28

6.1. Scénarios étudiés 28

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.2. Hypothèses 28
6.3. Scénario 0 – Référence 29
6.4. Scénario 1 – CPCU 30
6.5. Scénario 2 – Géothermie superficielle et solaire hybride 34
6.6. Scénario 3 – CPCU et solaire hybride 37

7. COMPARAISON DES SCENARIOS 40
7.1. Aspect économique 40
7.2. Aspect environnemental 41

8. SYNTHESE 43

9. FOCUS SUR L'ELECTRICITE 44
9.1. Sobriété 44
9.2. Efficacité 45
9.3. Renouvelable 45

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

1. ANALYSE DU CONTEXTE

1.1. Introduction

Le quartier de Chapelle-Charbon s'inscrit dans une réflexion énergétique de plus en plus ambitieuse. En effet, la loi transition énergétique à l'échelle nationale, la révision du plan climat énergie de la ville de Paris à l'échelle territoriale et la démarche volontariste évoquée pour ce projet inscrivent l'opération Chapelle Charbon dans une réflexion énergétique ambitieuse.

Les objectifs de cette étude sont de questionner :

- les opportunités territoriales,
- les potentiels de développement des énergies renouvelables,
- les besoins de consommation de l'opération,
- les ambitions et les axes de la stratégie énergétique du quartier.

Par ailleurs, il sera essentiel d'enrichir la stratégie énergétique retenue avec le futur Plan Climat de la ville de Paris qui s'appliquera pour le futur projet urbain.

Le contexte du projet, dans une zone en fort développement, nous a conduit à élargir le périmètre de réflexion pour anticiper les liens possibles avec les projets à proximité. Ces éléments font partie des éléments d'entrée pour co-construire la stratégie énergétique du projet.

Cette étude et les échanges qui l'alimentent, seront un outil d'aide à la décision pour positionner et dimensionner les ambitions du projet urbain Chapelle Charbon sur les aspects suivants :

- performance et conception énergétique des bâtiments,
- ressources mobilisables et moyens de production d'énergie renouvelable,
- opportunités d'expérimentation.

1.2. Le projet Chapelle Charbon

La ZAC se décompose en 2 phases : la première sur le secteur Chapelle Charbon regroupe 35 000 m² de logements, la seconde sur le secteur Cap 18 regroupe bureaux, logements et activités. La deuxième phase doit être achevée en 2025.

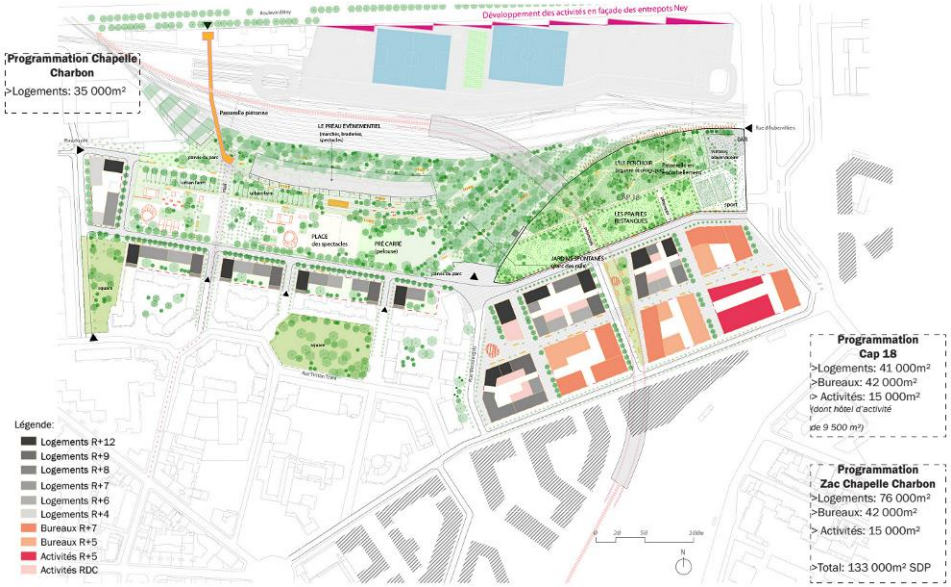


FIGURE 1 : PLAN MASSE ET PROGRAMMATION (SOURCE : ATELIER FRANÇOIS LECLERCQ)

Phase	Programme	Surface
Phase 1	Logements collectifs	35 000
Phase 2	Logements collectifs	41 000
Phase 2	Bureaux	42 000
Phase 2	Activités	15 000

FIGURE 2 : PROGRAMMATION DE LA ZAC

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

1.3. Le territoire Paris Nord Est en développement

La ZAC Chapelle Charbon s'inscrit dans une démarche de développement du Paris Nord Est élargi.

FIGURE 3: SITUATION DE LA ZAC (SOURCE : ATELIER FRANÇOIS LECLERCQ)

Le calendrier et les ambitions de la **ZAC Hébert** sont analogues à Chapelle Charbon. Concevoir une stratégie énergétique commune peut permettre de mutualiser les systèmes énergétiques et les investissements. Le raccordement au CPCU a été étudié pour le projet, mais n'a pas été jugée viable économiquement si le projet Hébert se raccorde seul.

Le **secteur Evangile** qui regroupe 1000 logements collectifs existants représente un gisement de consommations de chaleur très important (environ 4,5 GWh/an). Cette zone serait très intéressante à intégrer dans un réseau de chaleur mutualisé avec la ZAC Chapelle-Charbon (à condition que le chauffage actuel des logements soit collectif). **Des échanges plus poussés avec les copropriétés de cette zone doivent être menés pour statuer de la faisabilité de cette mutualisation.**

1.4. Plan Climat

Le futur Plan Climat de la Ville de Paris est en cours d'élaboration. Les hypothèses présentées ici se basent sur les éléments dont nous disposons à l'heure actuelle.

Le Plan Climat anticiperait la future réglementation thermique en demandant les niveaux suivants :

- RT 2012 – 20 % pour les logements et les crèches,
- RT 2012 – 30 % pour les bureaux et les bâtiments d'enseignement.

A terme, l'objectif de la ville de Paris serait d'atteindre la neutralité carbone en 2050.

Répondre à cet enjeu implique **d'anticiper dès aujourd'hui la performance de demain** afin de ne pas devoir rénover thermiquement en 2050 les bâtiments construits en 2020, et d'avoir les moyens de production d'énergie adéquats. **La priorité est donc de réduire autant que possible la demande énergétique des bâtiments.**

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

1.5. Analyse du bioclimatisme

1.5.1. Bâtiments

La question du bioclimatisme est fondamentale pour trouver l'accord entre la densité urbaine et l'ambition énergétique des bâtiments.

21 décembre 7h – 17h

21 mars 8h – 18h

21 juin 8h – 20h

FIGURE 4 : OMBRAGES SUR LE PROJET (SOURCE : VIZEA)

Lecture des simulations d'ombrage : plus une zone est sombre, plus elle est ombragée, et donc moins les apports solaires sont importants.

La densité des constructions et le positionnement des bâtiments neufs sont tels que les apports solaires passifs sont faibles. **Il n'est donc pas possible de compter sur cet apport énergétique pour réduire de manière importante les besoins de chauffage. L'isolation thermique et la compacité des bâtiments seront donc essentielles pour atteindre les niveaux de performance visés.**

Les bâtiments qui bénéficient des meilleures conditions d'ensoleillement pour réduire leur besoins de chauffage sont localisés sur la carte suivante :

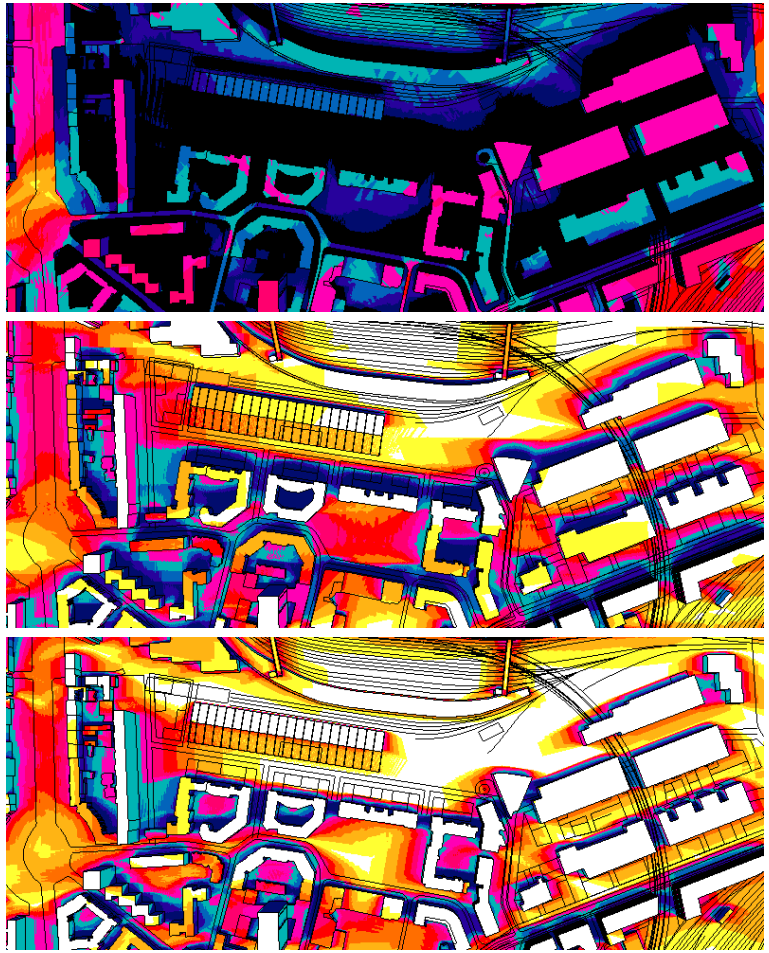
FIGURE 5 : BATIMENTS BENEFICIANT LE PLUS D'APPORTS SOLAIRES PASSIFS

Les **ouvertures doivent être optimisées** de manière à permettre de capter l'énergie solaire lors de la période de chauffe. Les dispositions nécessaires doivent être prises pour **éviter l'inconfort estival** : casquettes, protections solaires extérieures mobiles …

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

1.5.2. Espaces publics

Etat actuel



21 décembre
7h – 17h

21 mars
8h – 18h

21 juin
8h – 20h

FIGURE 6 : ETAT ACTUEL – OMBRAGES SUR L'ESPACE PUBLIC (SOURCE : VIZEA)

Etat projeté

21 décembre
7h – 17h

21 mars
8h – 18h

21 juin
8h – 20h

FIGURE 7 : ETAT PROJETE – OMBRAGES SUR L'ESPACE PUBLIC (SOURCE : VIZEA)

L'impact du projet est relativement faible sur l'espace public, mais limite encore un peu plus l'ensoleillement. **Des espaces ombragés devront être créés au cœur du parc pour la période estivale.**

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

2. BESOINS ENERGETIQUES ET ORIENTATIONS

2.1. Performance énergétique

Au regard de ce contexte, il nous semble essentiel d'intervenir sur deux axes essentiels pour définir la future stratégie énergétique de l'opération.

Construire des bâtiments sobres

La sobriété implique de réduire les besoins énergétiques réglementaires et spécifiques. **La problématique pour la ZAC Chapelle Charbon est de trouver un équilibre entre :**

- **des besoins énergétiques restreints au maximum,**
- **un coût de construction maitrisé et**
- **un contexte dense (peu d'apports solaires).**

Ainsi et dans la perspective de l'application du future plan climat, il nous semble pertinent d'envisager en **phase 1 un niveau équivalent à RT 2012 -20 % et en phase 2 un niveau équivalent à RT 2012 -40%** (performance compatible avec des bâtiments Passif).

Par ailleurs, dans une démarche volontariste, il nous semble indispensable, sauf usages spécifiques, **un objectif de zéro climatisation mécanique pour les bureaux et les activités.**

Au regard de ces ambitions, notamment RT 2012-40%, il sera toutefois important selon la typologie, la programmation et l'implantation de chaque bâtiment d'évaluer :

- l'impact financier,
- les contraintes architecturales et constructives,
- le coût global des solutions retenues.

Développer et consommer des énergies renouvelables sur le territoire local

Une fois les besoins et les consommations réduites, l'objectif est de satisfaire ces consommations par des énergies renouvelables afin de limiter l'impact environnemental (notamment les émissions de GES). **L'enjeu pour la ZAC Chapelle Charbon est de trouver les ressources renouvelables permettant de répondre à la fois à l'ambition environnementale du projet, aux contraintes de coûts et aux contraintes de gestion. Les opérations d'aménagement doivent également permettre le développement des énergies renouvelables sur un territoire. Notre approche met en évidence cette possibilité dans la définition des scénarios.**

2.2. Besoins énergétiques

Les besoins qui sont estimés dans la présente étude sont séparés en 4 catégories :

Besoins de chauffage : *chauffage des bâtiments. Il ne s'agit pas d'un calcul réglementaire. En effet, l'objectif est ici d'être le plus proche de la réalité possible. La température de consigne utilisée ici n'est donc pas celle de la RT 2012 qui est de 19 °C, mais elle est prise à 21,5 °C, ce qui correspond aux températures de consigne observées*.

Besoins d'ECS : *besoin d'eau chaude sanitaire. Le besoin d'ECS ne dépend que très peu de l'enveloppe du bâtiment. Le facteur le plus influent est en effet l'occupation et la typologie de ce bâtiment.*

Besoins de froid : *rafraichissement des bâtiments. Tout comme pour le chauffage, il ne s'agit pas d'un calcul réglementaire mais d'une approche empirique pour estimer au mieux les besoins de froid des bâtiments. Cependant, il nous semble important de questionner la nécessité de produire du froid sur cette opération.*

Besoins d'électricité : *ensemble des postes consommant de l'électricité. L'estimation de ce besoin ne se limite pas aux postes compris dans la RT (éclairage, ventilation et auxiliaires), mais inclut également les consommations d'électricité dites spécifiques, qui comprennent les besoins électriques des appareils électroménagers, des équipements multimédia …*

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Les besoins énergétiques estimés sont les suivants :

Phase	Programme	Performance	Surface (m²)	Besoin de chauffage (kWh/an)	Besoin d'ECS (kWh/an)	Puissance de chaleur (kW)	Besoin de froid (kWh/an)	Puissance defroid (kW)	Besoin d'électricité (kWh/an)
Phase 1	Logements	RT 2012 - 20 %	35 000	862 400	962 500	764	0	0	1 185 800
Phase 2	Logements	RT 2012 - 40 %	41 000	631 400	1 127 500	824	0	0	992 200
Phase 2	Bureaux	RT 2012 - 40 %	42 000	646 800	92 400	419	577 500	1 155	1 977 360
Phase 2	Activités	RT 2012 - 40 %	5 500	28 233	6 050	19	25 208	50	181 500
Phase 2	Hôtel	RT 2012 - 40 %	9 500	219 450	365 750	274	78 375	314	250 800
TOTAL			**133 000**	**2 388 283**	**2 554 200**	**2 300**	**681 083**	**1 519**	**4 587 660**

FIGURE 8 : ESTIMATIONS DES BESOINS D'ENERGIE (SOURCE : VIZEA)

Les besoins énergétiques les plus importants sont ceux des logements, qui représentent une grande partie de la programmation.
Les besoins de chaleur (chauffage et ECS) restent légèrement supérieurs aux besoins d'électricité (réglementaire et spécifique).

La stratégie énergétique, dans le cadre d'une démarche complète et s'inscrivant dans la transition énergétique, doit prendre en compte les différents besoins (chaleur, froid et électricité).

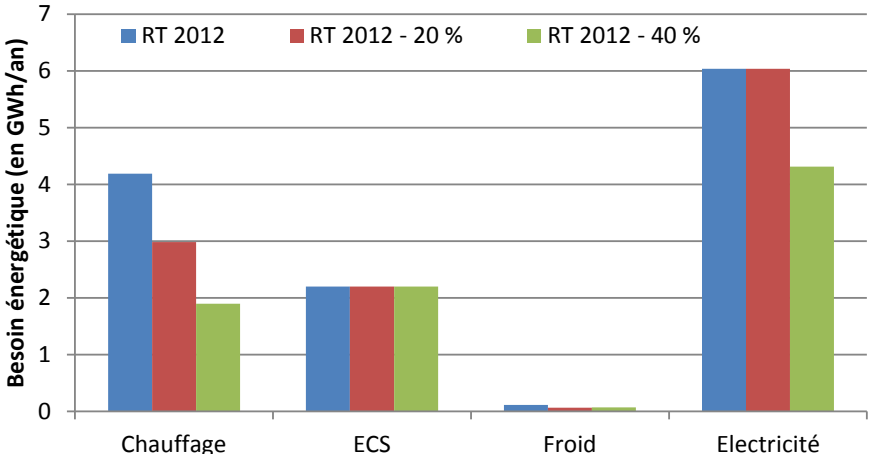


FIGURE 9 : COMPARAISON DES BESOINS ENERGETIQUES (SOURCE : VIZEA)

2.3. Enjeu de l'impact de la construction

Par ailleurs, il parait tout à fait cohérent de mener une réflexion sur les **émissions de GES et la consommation d'énergie grise de la phase construction**.
Le bâtiment est le premier secteur consommateur d'énergie en France, avant le transport et l'industrie, et le second secteur émetteur de gaz à effet de serre. La priorité a d'abord été de diminuer les consommations des bâtiments en phase exploitation.
Cependant, les consommations nécessaires à la fabrication, à la maintenance, à l'adaptation et à la déconstruction des bâtiments deviennent maintenant très importantes. Cette énergie grise devient un levier important de réduction des consommations énergétiques du bâtiment.
En effet, il est important de remarquer, que plus les impacts environnementaux lors de la vie du bâtiment sont réduits, plus proportionnellement sur le total des émissions, celles de la construction sont importantes. **Ainsi, le mode constructif devient tout aussi important que l'énergie consommée dès que les besoins énergétiques sont réduits. Les nouvelles réglementations tendent à appliquer cette approche. Ainsi, avec une ambition RT 2012 – 20% à -40%, les modes constructifs deviennent un enjeu majeur sur cette opération.**

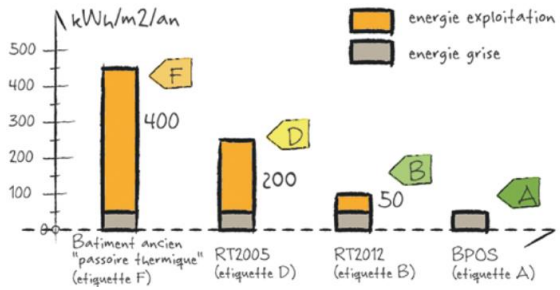


FIGURE 10 : EVOLUTION DE LA PROPORTION EXPLOITATION/CONSTRUCTION (SOURCE GT ICEB)

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

3. RESSOURCES ENERGETIQUES

3.1. Réseau de chaleur

3.1.1. Réseau existant : CPCU

Le réseau de chaleur du CPCU est alimenté à plus de 50 % par des EnR&R (notamment grâce à l'incinération des ordures ménagères et à la géothermie profonde).

Un forage géothermique sur le Dogger permettant d'alimenter le CPCU a d'ailleurs été réalisé pour la ZAC Claude Bernard.

Il n'est pas possible de se raccorder uniquement à cette installation géothermique pour plusieurs raisons :

- elle fait partie intégrante du réseau du CPCU (au même titre que les autres du CPCU) et cela engendrerait des travaux colossaux et inutiles (du fait de la proximité du CPCU la rue d'Aubervilliers et de l'éloignement du forage).
- Par ailleurs, la totalité de la production de chaleur du forage est d'ores et déjà exploitée par le CPCU.

Le réseau est présent à proximité immédiate de la ZAC, sur la rue d'Aubervilliers. Cette branche du réseau possède une capacité suffisante pour raccorder le projet de la ZAC mais également d'autres projets alentours d'après les échanges que nous avons pu avoir avec le CPCU.

La chaleur distribuée par cette branche du réseau est à 230 °C (vapeur surchauffée). **Pour la ZAC Chapelle-Charbon, une sous-station principale est donc nécessaire pour changer de régime de température et d'état**. En fonction du régime de température secondaire, il est tout à fait possible d'imaginer **un complément de production par d'autres énergies comme la géothermie superficielle ou le solaire thermique**. Le CPCU est d'ailleurs tout à fait ouvert à cette possibilité.

3.1.2. Pertinence d'un réseau de chaleur

La forte densité de construction et donc de consommation de chaleur, rend la solution du **réseau de chaleur tout à fait justifiée**. En effet, le projet atteint une densité énergétique d'environ **5 MWh/ml/an** (4690 MWh/an de chaleur sur la ZAC, pour un linéaire de réseau de chaleur de 950 m environ).
Le raccordement au CPCU permet de bénéficier d'une **chaleur disponible aisément et à un coût restreint et maitrisé**, sans avoir à implanter de système de production sur place. Un réseau propre à la ZAC est également possible, mais il faut alors **trouver une emprise suffisante pour installer une chaufferie**.
En **raccordant d'autres projets au réseau de chaleur** créé pour la ZAC Chapelle-Charbon, la densité énergétique pourrait être encore plus importante. Par exemple, si les logements existant du secteur Evangile et le projet Hébert de la SNEF intègrent ce réseau de chaleur, la densité énergétique atteint quasiment 7 MWh/ml/an (environ 9000 MWh/an de consommation de chaleur supplémentaires pour environ 1000 m de réseau en plus par rapport au périmètre de la ZAC uniquement).

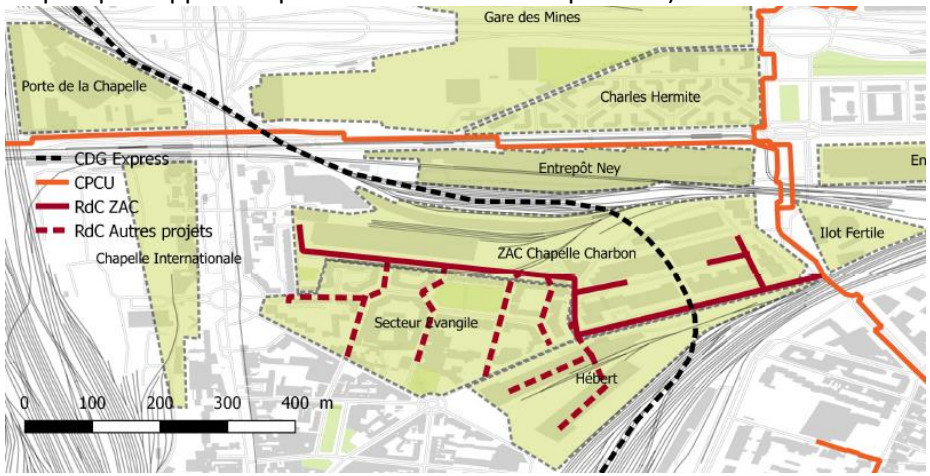


FIGURE 11 : TRACE ENVISAGEABLE DU RESEAU DE CHALEUR (SOURCE : VIZEA)

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Il est primordial d'anticiper le passage du Charles de Gaulle Express sur la ZAC pour éviter de complexifier et augmenter les coûts de travaux.

3.2. Energie solaire

3.2.1. Potentiel

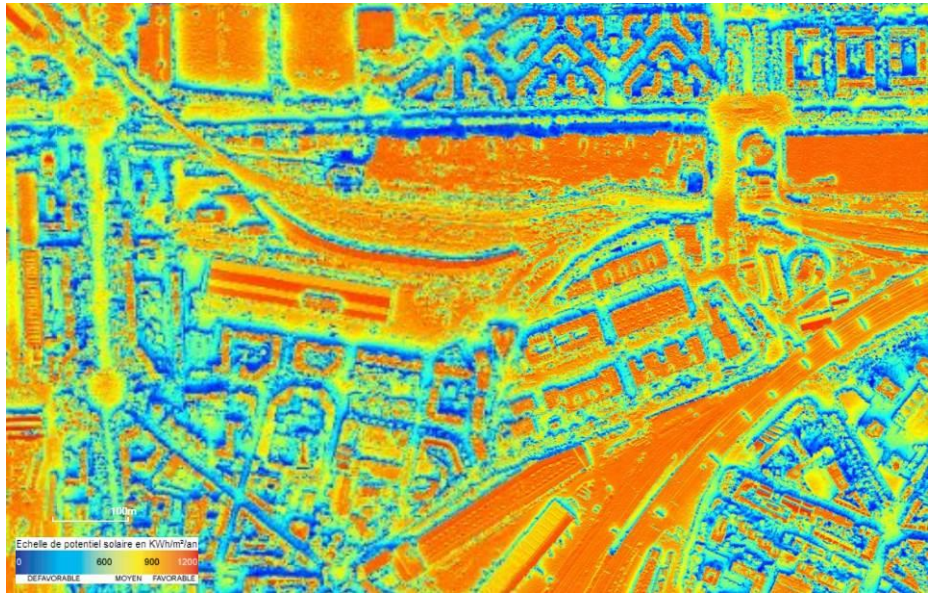


FIGURE 12 : CADASTRE SOLAIRE DETAILLE (SOURCE : APUR)

Le potentiel solaire peut atteindre 1200 kWh/m²/an pour les zones les plus exposées (sans ombrages), les mieux inclinés (30°) et les mieux orientées (plein sud).Les surfaces disponibles sont les toitures des bâtiments représentent 10 500 m² sur l'ensemble du projet.

Par ailleurs, il est également possible de valoriser la surface disponible sur le quai Ney, qui représente environ 1 500 m².

Les surfaces qui ne permettent pas de bénéficier de conditions optimales (ombrage trop important par d'autres bâtiments) ne présentent pas d'intérêt.

3.2.2. Solaire thermique

Le solaire thermique permettrait de couvrir partiellement les besoins d'ECS des logements. En effet, il faut compter 1,5 à 2 m² de panneaux solaires thermiques pour couvrir 50 % des besoins d'ECS d'un foyer. Une surface supérieure à ce ratio conduirait à une production trop importante en été (lorsque la production solaire thermique est maximale et que les besoins sont restreints). Une production de plus de 100 % des besoins engendre un échauffement du système qui peut dégrader fortement les panneaux et le système hydraulique.

FIGURE 13 : EXEMPLE D'INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE EN TOITURE TERRASSE (SOURCE : ACTU-ENVIRONNEMENT)

Sur la phase 1, les toitures terrasses des bâtiments de logements représentent une surface totale de 4500 m² environ, et sur la phase 2, elles représentent environ 6000 m². Or pour couvrir 50 % des besoins d'ECS par le solaire thermique, il faudrait environ 900 m² de panneaux sur la première phase et 1000 m² sur la seconde phase.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

L'objectif de couvrir 50 % des besoins d'ECS par le solaire thermique est donc tout à fait envisageable. Cela implique de conserver une emprise en toiture pour cet usage sur environ 25 % de la surface de toiture des bâtiments de logements.

	Echelle	Atouts	Contraintes
Solaire thermique	Bâtiment	- Couverture de 50 % des besoins d'ECS - Simplicité du système - Faible coût de l'énergie	- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage - Impose d'avoir une production d'ECS centralisée - Diminue la densité énergétique

FIGURE 14 : SYNTHESE SOLAIRE THERMIQUE

3.2.3. Solaire photovoltaïque

De la même manière, les toitures et d'autres espaces (comme le quai Ney) peuvent être utilisés pour la production énergétique solaire, avec le recours au solaire photovoltaïque.

FIGURE 15 : EXEMPLE D'INSTALLATION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE EN TOITURE TERRASSE (SOURCE : DANI ALU)

En mobilisant l'ensemble des surfaces disponibles sur les 2 phases (les bâtiments et le quai Ney), il est possible d'envisager au maximum quasiment 12 000 m² de panneaux solaires photovoltaïque bien orientés (plein sud) et bien inclinés (30 °).

Cela représente une production de l'ordre de 1400 MWh/an (soit un tiers du besoin d'électricité de la ZAC, besoins électriques conventionnels et spécifiques inclus).

Il est possible d'imaginer qu'une partie de cette production soit autoconsommée. Mais cela implique des montages complexes pour les bâtiments de logements. En effet cela nécessite une répartition de l'électricité produite de manière équitable et une gestion permettant un tel fonctionnement. Pour les bâtiments de bureaux, l'autoconsommation pourrait être plus adaptée, les consommations et la production étant simultanées.

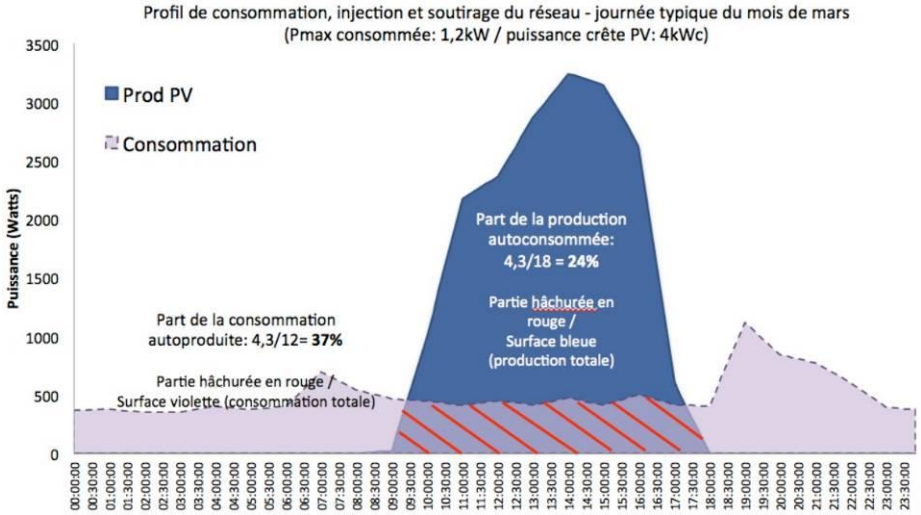


FIGURE 16 : EXEMPLE D'AUTOCONSOMMATION (SOURCE : HESPUL)

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Les surfaces disponibles peuvent permettre de couvrir environ 30 % des besoins annuels d'électricité.

	Echelle	Atouts	Contraintes
Solaire photovoltaïque	Bâtiment / ZAC	- Indépendant des besoins énergétiques (souplesse de déploiement) - Production locale d'électricité renouvelable - Possibilité d'autoconsommation - Permet de valoriser le quai Ney	- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage

FIGURE 17 : SYNTHESE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

3.2.4. Solaire hybride

L'autre alternative pour valoriser la ressource solaire est l'utilisation du solaire hybride.

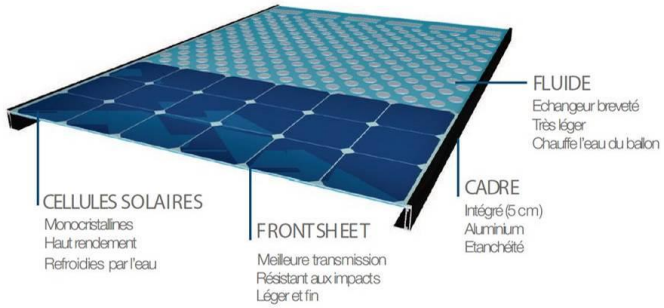


FIGURE 18 : SCHEMA D'UN PANNEAU SOLAIRE HYBRIDE (SOURCE : DUALSUN)

Un panneau solaire hybride permet une double production : thermique et électrique.
Pour couvrir 50 % des besoins d'ECS des logements, tout comme pour le solaire thermique, la surface nécessaire est légèrement supérieure (1250 m² pour la phase 1 et 1500 m² pour la phase 2). Mais cela permet une production d'électricité, sans consommer plus d'espace, d'environ 500 MWh/an.

Les surfaces disponibles permettent de couvrir 50 % des besoins d'ECS tout en assurant une production d'électricité (10 % des besoins annuels). C'est la technologie qui permet d'utiliser au mieux l'espace mobilisé.

	Echelle	Atouts	Contraintes
Solaire hybride	Bâtiment	- Couverture de 50 % des besoins d'ECS - Production locale d'électricité renouvelable - Possibilité d'autoconsommation	- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage - Impose d'avoir une production d'ECS centralisée - Diminue la densité énergétique

FIGURE 19 : SYNTHESE SOLAIRE HYBRIDE

3.3. Géothermie

3.3.1. Géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie est possible en île de France grâce à la présence de la nappe du Dogger à environ 2000 m sous la surface.

Déployer cette solution (qui implique 2 forages à 2000 m sous terre), nécessite un réseau de chaleur et des consommations de chaleur associées de l'ordre de 10 MW de puissance.

La ZAC Chapelle Charbon a besoin d'une puissance de chaud d'environ 2,3 MW, le projet ne justifie donc pas l'investissement dans un ouvrage aussi important.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

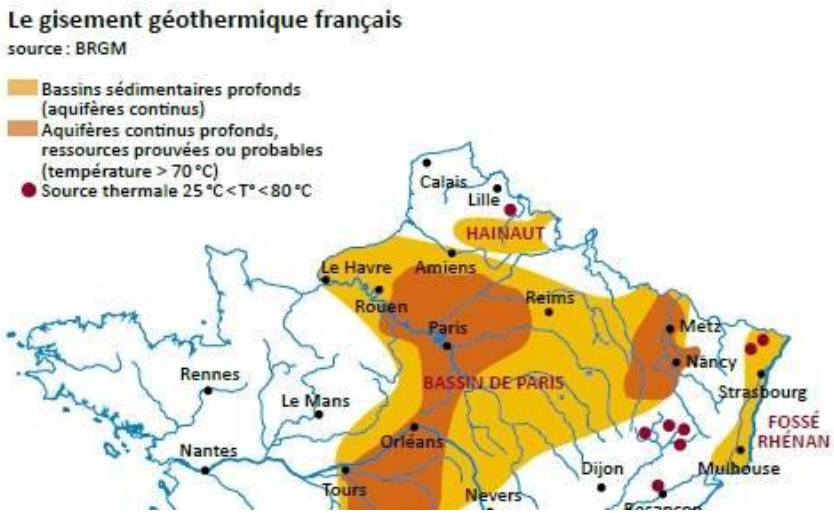


FIGURE 20 : POTENTIEL DE LA GEOTHERMIE BASSE ENERGIE (SOURCE : BRGM)

Cette solution est pertinente uniquement dans le cadre d'un réseau de chaleur auquel serait raccordé un consommateur important (le secteur Evangile représente par exemple environ 9 MW de chaleur).

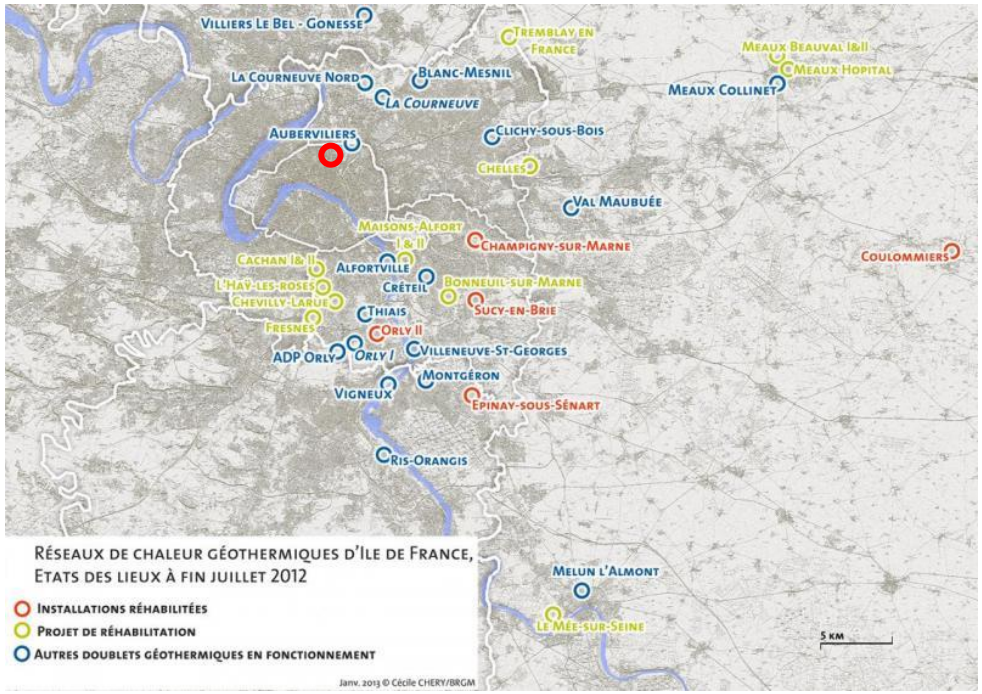


FIGURE 21 : CARTE DES INSTALLATION GEOTHERMIQUES SUR DOGGER EN ÎLE DE FRANCE

La proximité du forage sur le Dogger du CPCU à Aubervilliers peut éventuellement limiter la faisabilité de cette solution. En effet, des interférences (phénomène de bulle froide : refroidissement de la température du sol à proximité du point de forage) entres les forages sont possibles, ce qui aurait pour effet de limiter la capacité de production de chaleur et donc de ne pas permettre un équilibre économique.

La géothermie basse énergie est envisageable uniquement dans le cas d'une mutualisation avec d'importants consommateurs de chaleur. A cette étape de réflexion, nous n'avons pas identifié ce ou ces consommateurs supplémentaires nécessaires.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

	Echelle	Atouts	Contraintes
Géothermie basse énergie	ZAC + projets alentours	- Facilité d'implantation grâce au parc - Externalités positives (les projets alentours profitent de l'installation) - Production importante de chaleur renouvelable	- Impose d'avoir un réseau de chaleur avec d'importants consommateurs de chaleur - Investissement important - Nécessité de prévoir une emprise pour la maintenance exceptionnelle

FIGURE 22 : SYNTHESE GEOTHERMIE BASSE ENERGIE

3.3.2. Géothermie sur nappe superficielle

La géothermie superficielle implique l'utilisation d'une pompe à chaleur, ce qui permet de produire à la fois du chaud et du froid.

FIGURE 23 : POTENTIEL DE LA NAPPE SUPERFICIELLE (SOURCE : BRGM)

Nappe de l'Eocène moyen et inférieur

Potentiel : **Fort**
Profondeur : **10–20 m**
Débit : **>=100 m³/h**
Epaisseur : **75–150 m**
Transmissivité : **> 0.01 m²/s**
Minéralisation : **Fortement minéralisée**

FIGURE 24 : DONNEES DE LA NAPPE SUPERFICIELLE (SOURCE : BRGM)

Le débit de la nappe permet de couvrir une puissance d'environ 750 kW en chauffage.

Il est préférable d'utiliser cette ressource pour la phase 2 (même si la géothermie superficielle ne couvre que 50 % de la puissance de chaud demandée, soit 75 % des besoins de chaleur), car son utilisation pour la production de froid en été permet d'éviter un refroidissement local de la nappe et d'optimiser le bilan financier.

Par ailleurs, la phase 1 pourrait également bénéficier d'une installation similaire en ajoutant un deuxième doublet pour répondre à ses besoins de chaud. Cependant, il faudra évaluer si la nappe le permet et si celle-ci ne serait pas impactée par la présence de deux doublets pas assez espacés.

Par ailleurs, la nappe peut également être sollicitée directement (sans recours à une pompe à chaleur) en période estivale. Cela permet de limiter les risques de surchauffes intérieures sans pour autant climatiser les bâtiments. Ce mode de fonctionnement, appelé géocooling, est tout à fait adapté aux bureaux et aux surfaces d'activités dans le cadre où aucune climatisation n'est installée.

La géothermie superficielle sur nappe est une ressource particulièrement adaptée à la phase 2 (besoins de chaud et de froid), mais qui peut éventuellement être déployée sur la phase 1.

	Echelle	Atouts	Contraintes
Géothermie superficielle	ZAC	- Production de chaud et de froid - Possibilité de géocooling - Ressource disponible permettant de couvrir une grande partie des besoins	- Risque d'interférences si 2 forages - Implique la mise en place d'un réseau de chaleur - Nécessite un appoint de production de chaleur

FIGURE 25 : SYNTHESE GEOTHERMIE SUR NAPPE SUPERFICIELLE

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

3.3.3. Géothermie sur sondes

Sondes verticales

Du fait de la présence d'une nappe superficielle, cette solution n'est pas pertinente. En effet, il faudrait 75 sondes de 200 m de profondeur (soit 15 000 m de forages cumulés), là où 2 forages de 40 m suffisent pour avoir la même puissance avec la nappe superficielle.

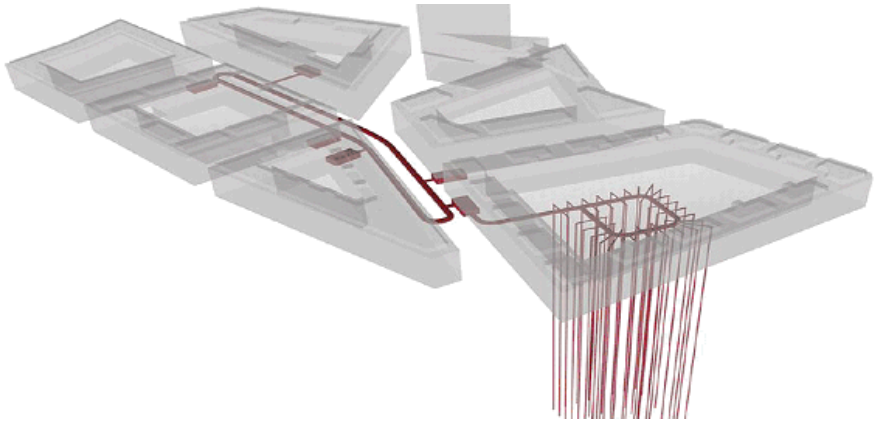


FIGURE 26 : ILLUSTRATION DE SOLUTION SUR SONDES

Sondes horizontales

Les sondes horizontales sont des solutions utilisées pour des maisons individuelles avec un terrain disponible attenant. Compte tenu des contraintes engendrées sur le terrain (pas de plantations, charges limitées …) et de la puissance nécessaire, cette solution n'est pas pertinente. En effet, cela représenterait un linéaire de 25 000 m de sondes (soit une surface de 12 500 m² environ) pour la même puissance qu'un doublet de forage sur la nappe superficielle.

	Echelle	Atouts	Contraintes
Géothermie sur sondes	Bâtiment		- Pas pertinent en présence d'une nappe superficielle

FIGURE 27 : SYNTHESE GEOTHERMIE SUR SONDES

3.4. Energies de récupération

3.4.1. Récupération d'énergie sur eaux grises

La récupération d'énergie via les eaux grises consiste à préchauffer l'eau froide destinée à l'ECS par un échange thermique avec les eaux grises évacuées. Ce dispositif passif permet une réduction de 20 à 30 % sur les consommations d'ECS. Il est particulièrement adapté aux logements collectifs avec une production centralisée de l'ECS.

FIGURE 28 : EXEMPLE D'INSTALLATION (SOURCE : GAÏA GREEN)

Ce dispositif possède un temps de retour de 3 à 6 ans suivant les contraintes et les caractéristiques des projets.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

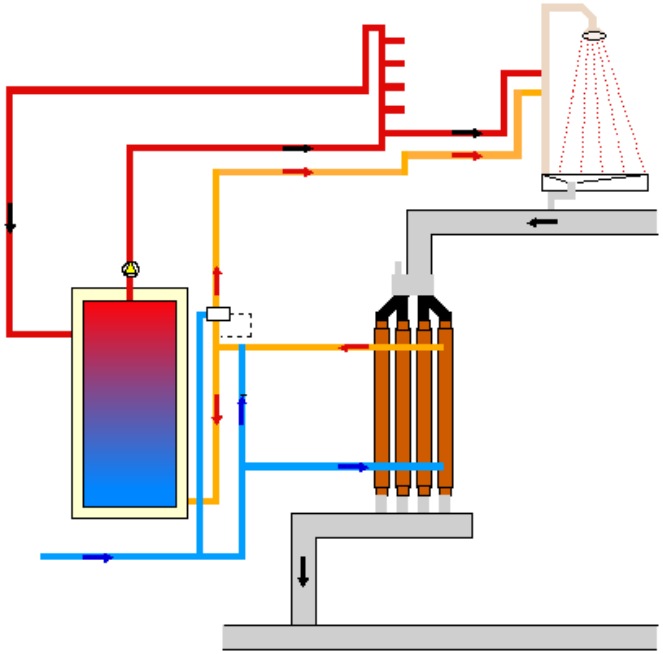


FIGURE 29 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA RECUPERATION DE CHALEUR SUR EAUX GRISES (SOURCE : GAÏA GREEN)

Ce système est tout à fait adapté pour les logements, mais diminue la densité énergétique dans le cas d'un réseau de chaleur. Cette solution peut être étudiée en complément d'un système principal.

	Echelle	Atouts	Contraintes
Récupération d'énergie sur eaux grises	Bâtiment	- Système passif et simple d'entretien - 20 % de réduction des consomamtions d'ECS	- Diminue la densité énergétique - Nécessite 2 réseaux d'eaux usées

FIGURE 30 : SYNTHESE RECUPERATION D'ENERGIE SUR EAUX GRISES

3.4.2. Récupération d'énergie sur groupe froid

En cas de besoins de froid spécifiques (serveurs informatiques, stockage réfrigéré), il est possible d'envisager une synergie entre l'évacuation de la chaleur produite par les groupes froid est le besoin de chaleur pour l'ECS des logements.

FIGURE 31 : EXEMPLE DE SYSTEME DE RECUPERATION D'ENERGIE SUR GROUPE FROID

La récupération d'énergie sur les groupes froids permet à la fois d'améliorer le rendement des groupes froid (dispersion de la chaleur plus facile dans l'eau que dans l'air, surtout en été lorsque l'air est à 30 °C ou plus) et de bénéficier d'un préchauffage de l'ECS gratuit, ce qui peut permettre de réduire au mieux de 30 % les besoins d'ECS.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Cela implique néanmoins une proximité immédiate entre les besoins de froid et les besoins d'ECS.

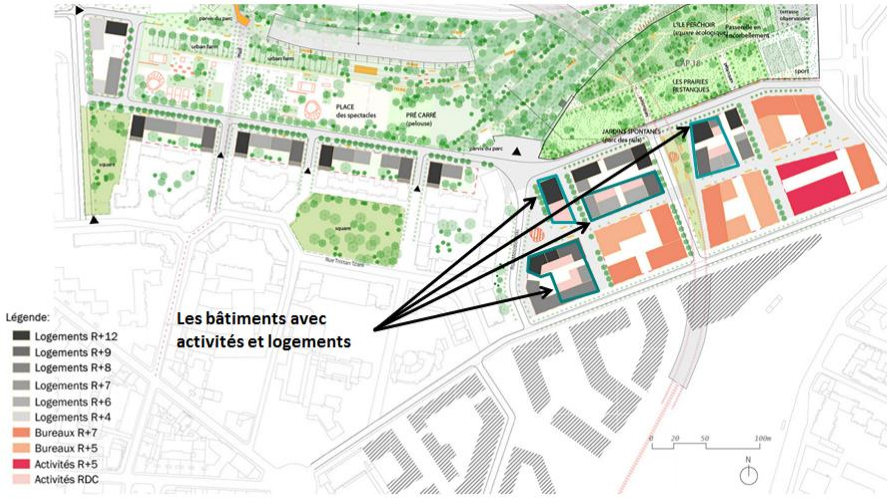


FIGURE 32 : BATIMENTS A PRIORI FAVORABLES A LA RECUPERATION D'ENERGIE SUR GROUPE FROID (SOURCE : VIZEA)

Pour les bâtiments avec des besoins de froid relativement importants (activités avec des besoins de réfrigération par exemple) et des besoins d'ECS (logements), cette solution peut être étudiée en complément d'un système principal.

	Echelle	Atouts	Contraintes
Récupération d'énergie sur groupe froid	Bâtiment	- Synergie entre groupe froid et production d'ECS - Amélioration du rendement des groupes froid - Préchauffage de l'ECS	- Proximité immédiate des besoins de froid et d'ECS

FIGURE 33 : SYNTHESE RECUPERATION D'ENERGIE SUR EAUX GRISES

3.5. Bois énergie

Les contraintes d'emprise foncière (bâtiment de chaufferie, stockage, aire de livraison) et d'accès (fréquence d'approvisionnement par des camions via des axes routiers inappropriés) font trop importantes pour imaginer déployer cette solution sur la ZAC.

	Echelle	Atouts	Contraintes
Bois énergie	Bâtiment / ZAC		- Emprise foncière importante (stockage et aire de livraison notamment) - Difficulté d'accès pour la livraison du combustible

FIGURE 34 : SYNTHESE BOIS ENERGIE

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

3.6. Synthèse

	Echelle	Atouts	Contraintes	Taux EnR Chauffage	Taux EnR ECS	Taux EnR Electricité	Taux EnR Total
Solaire thermique	Bâtiment	- Couverture de 50 % des besoins d'ECS - Simplicité du système - Faible coût de l'énergie	- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage - Impose d'avoir une production d'ECS centralisée - Diminue la densité énergétique	0%	50%	0%	12%
Solaire photovoltaïque	Bâtiment / ZAC	- Indépendant des besoins énergétiques (souplesse de déploiement) - Production locale d'électricité renouvelable - Possibilité d'autoconsommation - Permet de valoriser le quai Ney	- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage	0%	0%	30%	15%
Solaire hybride	Bâtiment	- Couverture de 50 % des besoins d'ECS - Production locale d'électricité renouvelable - Possibilité d'autoconsommation	- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage - Impose d'avoir une production d'ECS centralisée - Diminue la densité énergétique	0%	50%	10%	17%
Géothermie basse énergie	ZAC + projets alentours	- Facilité d'implantation grâce au parc - Externalités positives (les projets alentours profitent de l'installation) - Production importante de chaleur renouvelable	- Impose d'avoir un réseau de chaleur avec d'importants consommateurs de chaleur - Investissement important - Nécessité de prévoir une emprise pour la maintenance exceptionnelle	90%	90%	0%	44%
Géothermie superficielle	ZAC	- Production de chaud et de froid - Possibilité de géocooling - Ressource disponible permettant de couvrir une grande partie des besoins	- Risque d'interférences si 2 forages - Implique la mise en place d'un réseau de chaleur - Nécessite un appoint de production de chaleur	80%	50%	0%	32%
Géothermie sur sondes	Bâtiment		- Pas pertinent en présence d'une nappe superficielle	Non pertinent			-
Récupération d'énergie sur eaux grises	Bâtiment	- Système passif et simple d'entretien - 20 % de réduction des consomamtions d'ECS	- Diminue la densité énergétique - Nécessite 2 réseaux d'eaux usées	0%	20%	0%	5%
Récupération d'énergie sur groupe froid	Bâtiment	- Synergie entre groupe froid et production d'ECS - Amélioration du rendement des groupes froid - Préchauffage de l'ECS	- Proximité immédiate des besoins de froid et d'ECS	0%	5%	0%	1%
Bois énergie	Bâtiment / ZAC		- Emprise foncière importante (stockage et aire de livraison notamment) - Difficulté d'accès pour la livraison du combustible	80%	80%	0%	39%
CPCU	ZAC	- Coût de la chaleur maitrisé et stable dans le temps - Proximité du réseau (rue d'Aubervilliers) - Pas d'appoint nécessaire - Emprise réduite (1 sous-station pricnipale poue la ZAC et 1 sous-station secondaire par bâtiment) - Possibilité d'avoir une production EnR complémentaire raccordée au réseau du CPCU	- Taux d'EnR induit par le CPCU (mais possibilité de production complémentaire sur la ZAC)	50%	50%	0%	24%

FIGURE 35 : SYNTHESE DES RESSOURCES DISPONIBLES

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

4. SOLUTIONS INNOVANTES

4.1. Réseau de chaleur solaire avec stockage thermique intersaisonnier

Les réseaux de chaleur récents utilisent un régime de température plus faible que les réseaux plus anciens. Cela permet de mobiliser d'avantage de ressources énergétiques pour la production de chaleur. Ainsi, il est aujourd'hui possible de concevoir des réseaux de chaleur alimentés par des PAC eau/eau ou des panneaux solaires thermiques.

Bien que ce type de réseau ne soit pas très développé en France, des exemples existent.

Par ailleurs, la problématique du stockage thermique intersaisonnier est une problématique qui peut être intégrée. En effet, la ressource solaire étant disponible en été et le besoin de chauffage concentré sur l'hiver, il est pertinent d'envisager un stockage d'une saison à l'autre.

Exemple 1 : Drake Landing Solar Community (Canada)

La stratégie énergétique de ce quartier est de capter le maximum de chaleur via des panneaux solaires thermiques. En été cette chaleur est utilisée directement pour l'ECS, et le surplus de production est stocker grâce à des sondes géothermiques.

En intersaison, la production directe suffi pour l'ECS, mais aucun surplus n'est produit.

En hiver, la production thermique est très faible, la chaleur stockée pendant l'été est alors redirigée vers le réseau de chaleur du quartier pour les besoins de chauffage.

FIGURE 37 : QUARTIER EQUIPE DE PANNEAUX SOLAIRES

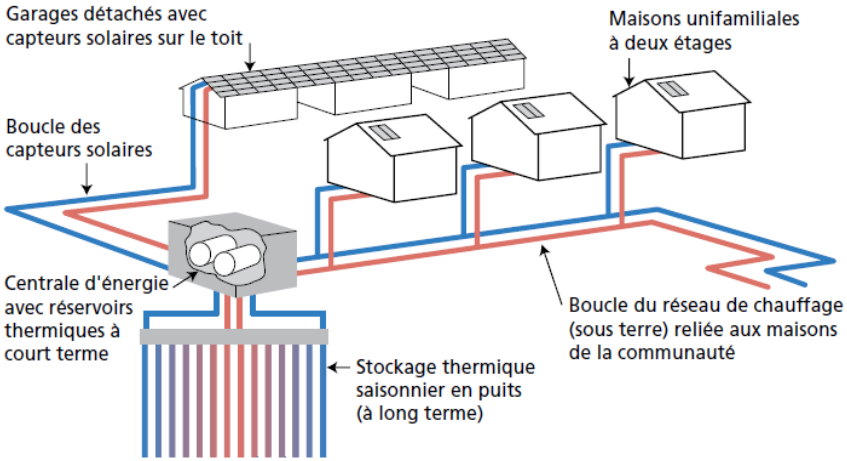


FIGURE 38 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'INSTALLATION GLOBALE

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Exemple 2 : Malmö Bo01 (Suède)

FIGURE 39 : INSTALLATIONS SOLAIRES DANS L'ECOQUARTIER BO01

Plusieurs installations de solaire thermique de petite taille sont connectées directement au réseau de chaleur du quartier. Cette chaleur est directement intégrée au réseau et redistribuée via ce même réseau.

Cette vente de chaleur est contractualisée avec l'opérateur du réseau.

Au total, 1370 m² de panneaux solaires sont connectés au réseau de chaleur, ce qui représente 316 MWh/an de chaleur solaire fournit au réseau.

Exemple 3 : Ecoquartier de Juvignac (34, France)

FIGURE 40 : INSTALLATION SOLAIRE DANS L'ECOQUARTIER DE JUVIGNAC

Le réseau de chaleur de l'écoquartier de Juvignac (34) est alimenté par le bois énergie (via une chaudière de 1250 kW) et 300 m² de panneaux solaires thermiques.

Le réseau délivre une chaleur entre 75 et 85 °C.

Quelle place pour une telle installation dans le projet de Chapelle-Charbon ?

Plusieurs fonctionnements sont envisageables :

1/ Une production thermique qui alimente directement le réseau de chaleur (qui est soit propre à la ZAC, soit l'extension du CPCU). La surface de panneaux solaires thermiques est donc dimensionnée par la capacité du réseau à absorber la production de chaleur en été. Dans ce cas, il n'y a pas de stockage nécessaire. En cas de raccordement au CPCU, le réseau de chaleur

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

peut être l'exutoire du surplus de production de la ZAC par rapport à ses propres besoins.

2/ La surface de panneaux est très importante et l'objectif est de stocker de la chaleur d'une saison sur l'autre (soit via des sondes, soit via une autre solution : réservoir, chaleur latente, stockage chimique …) afin d'avoir un taux de couverture par le solaire le plus important possible.

Quel rôle du CPCU ?

Deux options sont possibles :

- Soit le réseau de la ZAC est une extension du CPCU et est géré par le CPCU. Dans ce cas, soit l'installation solaire thermique est gérée directement par le CPCU comme n'importe quelle autre installation de production (correspond plutôt au cas où les panneaux solaires ne seraient pas sur les bâtiments), soit le CPCU achète de la chaleur produite par ces panneaux solaires, qui sont eux gérés par un tiers (correspond plutôt au cas où les panneaux solaires seraient sur les bâtiments).
- Soit le réseau de chaleur est celui de la ZAC, dans ce cas, l'opérateur gère directement les panneaux solaires thermiques comme une unité de production classique.

4.2. Power-to-gas

Cette solution ne s'intègre pas directement dans la stratégie énergétique du quartier, mais s'inscrit plutôt dans la stratégie de transition énergétique de la ville ou du territoire.

Dans le but d'amorcer la transition énergétique, un des enjeux est de passer des énergies de stock (nucléaire, pétrole, gaz), à des énergies de flux (hydraulique, solaire, éolien …).

La problématique est donc de pouvoir répondre à chaque instant à la demande énergétique du territoire, car les énergies de flux ont par essence une production variable (en fonction du vent, de l'ensoleillement, des saisons …).

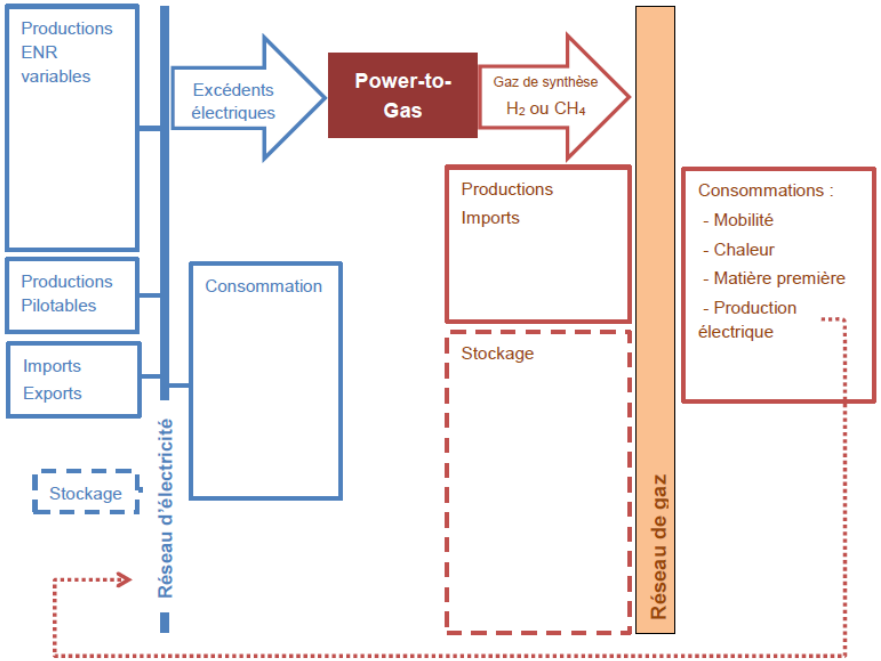


FIGURE 41 : PRINCIPE DU POWER-TO-GAS

L'une des solutions pour répondre à cette problématique est de produire du biogaz lorsque la production électrique est très importante et qu'elle dépasse les besoins instantanés.

Le biogaz ainsi créé peut être injecté sur le réseau puis servir de combustible ou de carburant quand la demande le nécessitera. Les principaux avantages de cette solution sont les suivants :

- le réseau de gaz sert de stockage (pas d'installation à créer),

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

- le stockage est sans pertes (à part d'éventuelles fuites),
- le biogaz créé facilement transportable dans les réseaux,
- la ressource est disponible au moment de la demande,
- le biogaz est compatible avec les équipements existants (il est intégré au réseau de gaz).

La production du méthane se fait en 2 étapes :

- l'électrolyse de l'eau : utilisation de l'électricité pour la production de dihydrogène,
- la méthanation : transformation du dihydrogène en méthane.

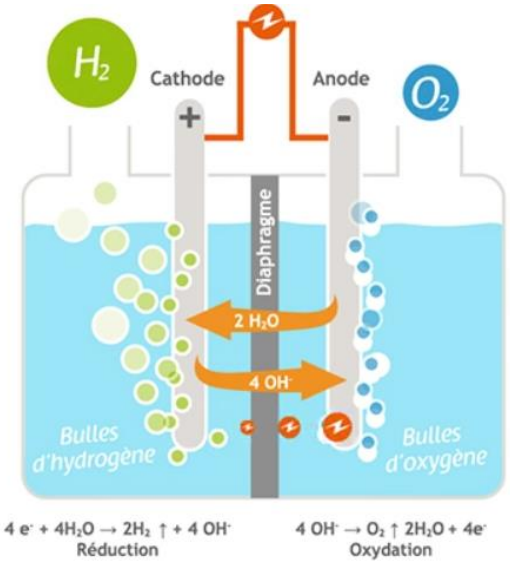


FIGURE 42 : ELECTROLYSE DE L'EAU

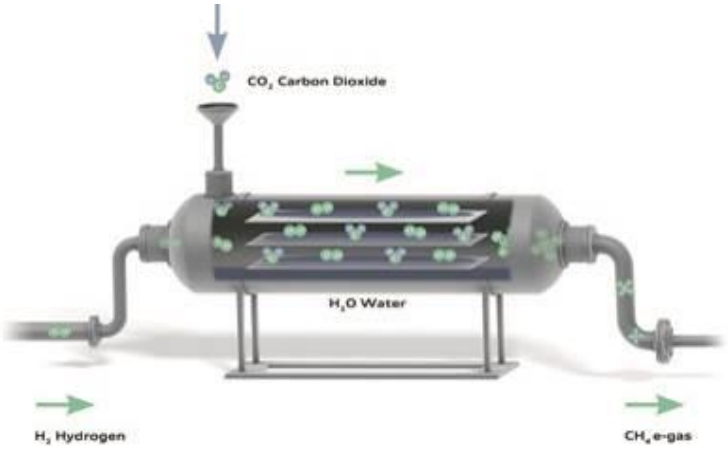


FIGURE 43 : METHANATION

<u>Quelle place de cette solution dans le projet ?</u>

Dans le cadre d'une production importante d'électricité via le solaire photovoltaïque, cette expérimentation peut constituer une initiative importante de la transition énergétique du territoire.

Cette solution sort du cadre de la stratégie énergétique du quartier, mais permet de lier le quartier et son territoire. De plus, cette expérimentation peut être reproduite sur d'autres opérations.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

5. STRATEGIES ENERGETIQUES POSSIBLES

Le choix des scénarios est basé sur trois objectifs principaux :

- Faire appel au maximum aux ENR, ainsi tendre vers le plus haut taux d'ENR.
- Répondre à minima aux besoins thermiques (les besoins électriques pouvant dans tous les cas être satisfaits par le réseau électrique national ou par une initiative propre).
- Puis, s'adapter aux caractéristiques du territoire dans une logique de synergie entre le projet et son environnement.

Le premier point qui parait être un intangible est la performance des bâtiments :

- **à minima RT 2012 -20 % en phase 1 et**
- **RT 2012 -40 % en phase 2,**
- **et absence de climatisation pour les bureaux et activités.**

Le second intangible de la stratégie énergétique est le recours à un réseau de chaleur sur la ZAC Chapelle Charbon.
Ce choix technique permet de proposer et mutualiser au mieux la production d'énergie renouvelable sur l'opération. Cependant, elle impose d'anticiper le passage du Charles de Gaulle Express pour éviter les surcoûts liés à des travaux sans tranchée par exemple.
Pour **structurer la future stratégie énergétique de l'opération**, il convient de **distinguer l'énergie principale des énergies complémentaires**.

L'énergie principale constitue la colonne vertébrale de la stratégie énergie énergétique. En complément de ce choix structurant, il est possible d'adjoindre des compléments pour ajuster les capacités de production à la demande énergétique.

Les différentes **sources d'énergies principales** identifiées sont les suivantes :

Energie principale	Echelle	Taux d'EnR		Atouts	Contraintes
		Chauffage	ECS		
CPCU	ZAC	50%	50%	- Coût de la chaleur maitrisé et stable dans le temps - Proximité du réseau (rue d'Aubervilliers) - Pas d'appoint nécessaire - Emprise réduite (1 sous-station pricnipale poue la ZAC et 1 sous-station secondaire par bâtiment) - Possibilité d'avoir une production EnR complémentaire raccordée au réseau du CPCU	- Le choix d'aller vers un taux d'EnR plus important doit se faire avec le CPCU
Dogger	ZAC + alentours	90%	90%	- Facilité d'implantation grâce au parc - Externalités positives (les projets alentours profitent de l'installation) - Production importante de chaleur renouvelable	- Nécessite d'avoir d'autre concommateurs de chaleur reliés - Proximité du forage d'Aubervilliers : attention à la durabilité de la ressource - Investissement important
Géothermie superficielle	ZAC	80%	50%	- Prouction de chaud et de froid	- 2 doublets de forage à réaliser pour pouvoir couvrir toute la ZAC - Création dd'un réseau de chaleur nécessaire - Appoint de production nécessaire

FIGURE 44 : ENERGIES PRINCIPALES MOBILISABLES

Au regard, des atouts et contraintes identifiés, les deux ressources les plus pertinentes à mobiliser sont :

- le **réseau de chaleur du CPCU** : sa proximité, l'intérêt économique pour les consommateurs et la possibilité de complément d'une production EnR sur la ZAC en font une réelle opportunité,
- la **géothermie superficielle** : la ressource est en phase avec les besoins (la puissance d'un forage permet de couvrir la phase 1, un second forage couvre la phase 2). La possibilité de produire du froid (ou de faire du géocooling) permet de valoriser au mieux la ressource.

Au contraire, le Dogger implique des contraintes (raccordement du secteur évangile ou d'un autre secteur très consommateur impératif) et des risques (quel potentiel réel à 2 000 m sous terre ? quelle évolution de la ressource avec la proximité du forage d'Aubervilliers ?).

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Les **ressources complémentaires mobilisables** sont les suivantes :

Solution technique	Atouts	Contraintes	Energie produite
Récupération de chaleur sur eaux grises	- Système passif : pas de consommations associées - Simplicité d'usage et d'entretien - Réduction de 20 % à 30 % des consommations d'ECS - Pertinent pour le logement collectif	- Diminue la densité énergétique en cas de réseau de chaleur - Nécessite un double réseau pour l'évacuation des eaux usées (eaux de douches et autres eaux usées) - Hauteur sous-plafond importante en RdC ou sous-sol : 3 m pour optimiser l'échange thermique - Implique une production collective pour l'ECS	Chaleur : 637 MWh/an, soit 25 % de l'ECS des logements
Solaire thermique	- Couverture de 50 % des besoins d'ECS annuels (variation suivant les périodes de l'année)	- Diminue la densité énergétique en cas de réseau de chaleur - Implique une production collective pour l'ECS - Utilisation des toitures pour un usage énergétique : éventuel conflit avec d'autres usages des toitures	Chaleur : 1275 MWh/an, soit 50 % de l'ECS des logements
Solaire photovoltaïque	- Production locale d'électricité renouvelable - Déploiement souple : décorellé des besoins (pas de surface minimum ou maximum)	- Utilisation des toitures pour un usage énergétique : éventuel conflit avec d'autres usages des toitures	Electricité : Au maximum 1400 MWh/an d'électricité (soit 30 % des besoins annuels)
Solaire hybride	- Couverture de 50 % des besoins d'ECS annuels (variation suivant les périodes de l'année) - Production locale d'électricité renouvelable	- Diminue la densité énergétique en cas de réseau de chaleur - Implique une production collective pour l'ECS - Utilisation des toitures pour un usage énergétique : éventuel conflit avec d'autres usages des toitures	Chaleur : 1275 MWh/an soit 50 % de l'ECS des logements Electricité : 500 MWh/an d'électricité (soit 10 % des besoins annuels)
Solaire thermique intégré à un réseau de chaleur	- Couverture de 80 % des besoins d'ECS annuels (variation suivant les périodes de l'année) - Surplus de production thermique resdictribué vers le réseau de chaleur	- Utilisation des toitures pour un usage énergétique : éventuel conflit avec d'autres usages des toitures	Chaleur : 5100 MWh/an (soit plus de 100 % des besoins de chaleur annuels)
Solaire hybride intégré à un réseau de chaleur	- Couverture de 70 % des besoins d'ECS annuels (variation suivant les périodes de l'année) - Surplus de production thermique resdictribué vers le réseau de chaleur - Production locale d'électricité renouvelable	- Utilisation des toitures pour un usage énergétique : éventuel conflit avec d'autres usages des toitures	3500 MWh/an (soit 75 % des besoins de chaleur annuels) Electricité: 1400 MWh/an d'électricité (soit 30 % des besoins annuels)

FIGURE 45 : RESSOURCES ENERGETIQUES COMPLEMENTAIRES

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

La ressource complémentaire la plus pertinente est **le solaire hybride**. Plusieurs raisons à cela :

- c'est la solution solaire qui valorise le mieux l'espace occupé : double production électrique et thermique,
- les surfaces disponibles en toiture permettent de couvrir 50 % de l'ECS des logements pour les phases 1 et 2,
- il est envisageable de développer le solaire hybride en couplant cette solution avec le réseau de chaleur.

Il est en plus possible de valoriser les espaces disponibles en installant du solaire photovoltaïque pour apporter une production électrique plus importante au quartier.

Cependant, dans une volonté de mettre en place une stratégie énergétique aussi vertueuse que possible et tournée vers l'innovation, **le choix de développer un réseau de chaleur intégrant une production de chaleur complémentaire par le solaire thermique ou hybride est tout à fait pertinent, d'autant plus que le CPCU est tout à fait ouvert à une telle solution.**

Chaque projet d'aménagement est une opportunité pour un territoire pour développer la production d'énergie renouvelable.
En fonction des ambitions qui seront portées par le projet, ce rayonnement peut être plus ou moins grand.
Ainsi, nous identifions ci-contre une échelle d'ambitions pour le projet Chapelle Charbon, avec des scénarios d'approvisionnement identifiés.

<u>Problématiques à débattre et à statuer :</u>

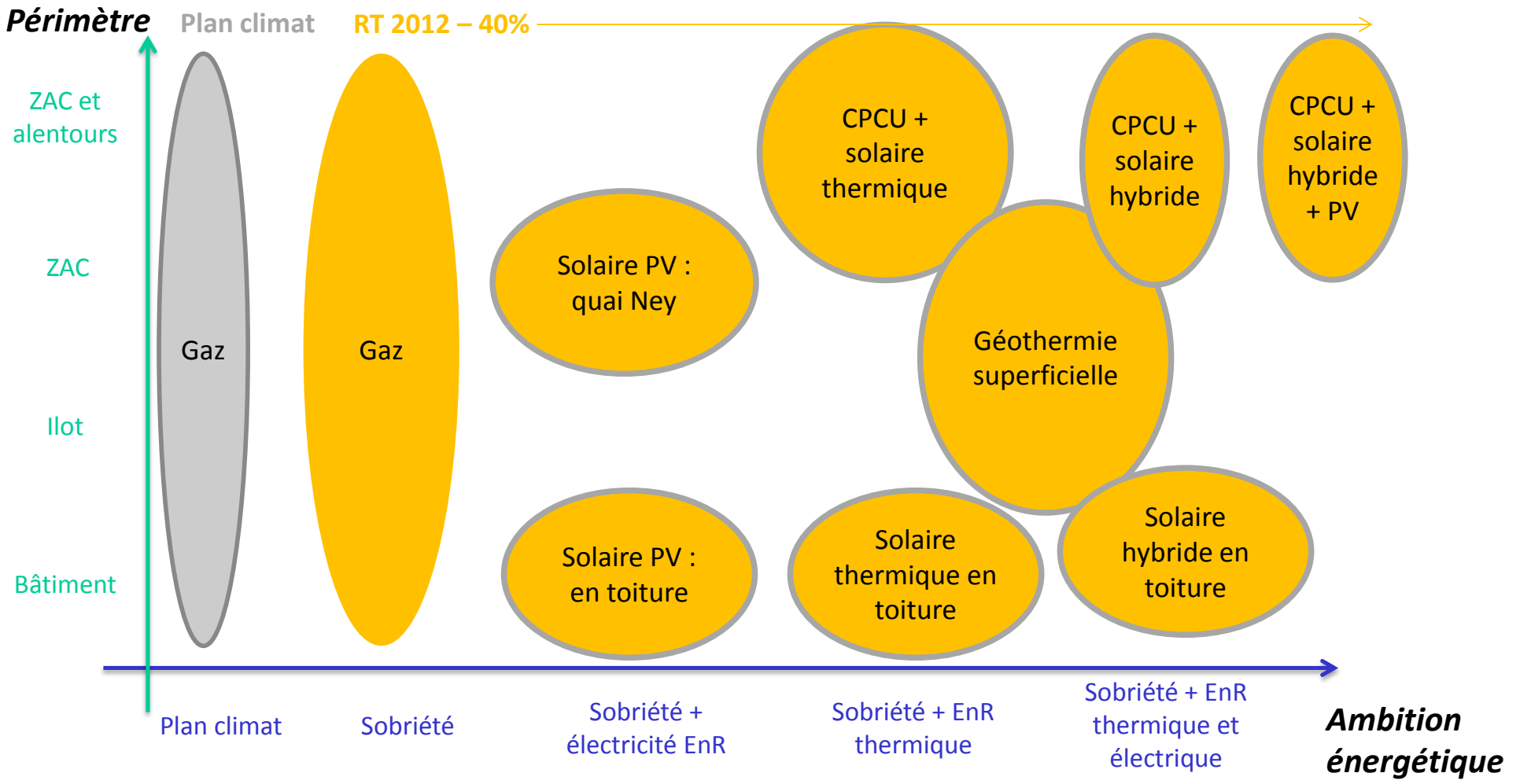
- quelle échelle de rayonnement pour la stratégie énergétique du projet ?
- Le bilan d'aménagement de la future ZAC permettrait-il de maintenir une exigence RT 2012 -40% sur l'ensemble de l'opération ?
- Quelle est le scénario le plus adapté au phasage future de l'opération et des opérations à proximité ?
- Peut-on envisager l'intégration d'une expérimentation innovante sur un bâtiment ou un îlot ?
- Est-il envisageable d'utiliser au maximum les toitures pour de la production d'énergie renouvelable ?

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Les principales possibilités de stratégie énergétique qui s'offrent au projet sont représentées ci-dessous. Deux paramètres caractérisent chaque positionnement stratégique :

1. le périmètre de définition (axe des ordonnées) et
2. l'ambition énergétique (axe des abscisses).

En fonction du niveau souhaité pour chacun de ces critères, les solutions présentées ici permettent d'illustrer quelle stratégie est possible. La stratégie se définit quant à elle à la fois par le niveau de performance de bâtiments (plan climat en gris ; niveau RT 2012 -40 % en jaune) et par les systèmes énergétiques mobilisés (CPCU, solaire hybride …).
Le positionnement relatif des différents systèmes techniques est en fonction de leur déploiement (il est par exemple possible de déployer le solaire PV sur 10 m² comme sur l'ensemble des toitures de la ZAC).



Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6. ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE DES SCENARIOS ENERGETIQUES

6.1. Scénarios étudiés

Scénario	Programme	Chauffage	ECS	Froid	Electricité
Référence	Habitat collectif	Chaudière gaz à l'iot		-	-
	Bureaux	PAC Air/air réversible	Ballon électrique	PAC Air/air réversible	-
	Activités	PAC Air/air réversible	Ballon électrique	PAC Air/air réversible	-
CPCU	Habitat collectif	CPCU		-	-
	Bureaux	CPCU		Groupe froid	-
	Activités	CPCU		Groupe froid	-
Géothermie superficielle et solaire hybride	Habitat collectif	Géothermie + gaz	Géothermie + solaire hybride	-	Solaire hybride
	Bureaux	Géothermie + gaz	Ballon électrique	PAC sur nappe	-
	Activités	Géothermie + gaz	Ballon électrique	PAC sur nappe	-
CPCU et solaire hybride	Habitat collectif	CPCU	CPCU + solaire hybride	-	Solaire hybride
	Bureaux	CPCU		Groupe froid	-
	Activités	CPCU		Groupe froid	-

FIGURE 46 : SCENARIOS D'APPROVISIONNEMENT ETUDIES

6.2. Hypothèses

Ressource	Tarif	Cout de l'énergie + abonnement (€/kWh)	Variation Annuelle (%)
Electricité	Electricité domestique	0,16	4,80%
	Electricité entreprise	0,12	5,00%
	Electricité industriels	0,1	5,00%
Gaz	Gaz naturel domestique	0,06	4,00%
	Gaz naturel entreprise/professionnel	0,05	4,00%
Bois	Granulés en vrac	0,05	3,00%
	Plaquettes forestières	0,02	3,00%
Chaleur	Réseau de chaleur existant	0,069	2,00%

FIGURE 47 : HYPOTHESES ECONOMIQUES

Ressource	Ratio EP/EF	Emissions de GES (g $eqCO_2$/kWh)	Emissions de SO2 (g/kWh)	Emissions de NOx (g/kWh)	Déchets Nucléaires FMA (g/kWh)	Déchets Nucléaires HA (g/kWh)	% EnR
Electricité	3,15	180	0,89	0,47	0,05	0,01	13,6%
Gaz	1,1	234	0	0,17	0	0	0,03%
Bois	0,3	0	0	0,32	0	0	100%
CPCU	0,58	172	0	0,1	0	0	55,0%

FIGURE 48 : HYPOTHESES ENVIRONNEMENTALES

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Définitions des indicateurs :

- GES : contribution au réchauffement climatique
- SO_2 : contribution à l'acidification de l'eau
- NOx : particules fines
- Déchets FMA (faibles et moyenne activité) : production de déchets nucléaires FMA
- Déchets HA (haute activité) : production de déchets nucléaires HA

6.3. Scénario 0 – Référence

6.3.1. Présentation du scénario

Le scénario de référence représente le cas « tendanciel », c'est à dire le cas mis en œuvre sans incitation ou volonté particulière. Cela correspond à un investissement restreint et des équipements techniques classiques (ayant recours à des énergies non renouvelables). Aucune mutualisation grande échelle n'est prévue.

Scénario	Programme	Chauffage	ECS	Froid	Electricité
Référence	Habitat collectif	Chaudière gaz à l'iot		-	-
	Bureaux	PAC Air/air réversible	Ballon électrique	PAC Air/air réversible	-
	Activités	PAC Air/air réversible	Ballon électrique	PAC Air/air réversible	-

FIGURE 49 : DESCRIPTION – SCENARIO 0

6.3.2. Analyse des résultats : indicateurs économiques

L'investissement pour l'ensemble de la ZAC est limité pour les systèmes techniques : en moyenne 4,5 € TTC/m². Ce coût d'investissement sera à porter par les promoteurs. Il existera des variations suivant les ilots et les bâtiments en fonction de la densité de construction et de la fonction du bâtiment.

A l'exploitation, les usagers auront un coût de l'énergie moyen (sur 25 ans, pour le chauffage, l'ECS et le froid) de 129,9 €TTC/MWh.

Bilan économique	
Investissement total (€ TTC)	595 200
Subventions (€)	0
Investissement non subventionné (€ TTC)	595 200
Coût de l'énergie moyen (€ TTC/MWh)	129,9
Entretien moyen (€ TTC/MWh)	5,7
Maintenance moyen (€ TTC/MWh)	1,2

FIGURE 50 : RESULTATS ECONOMIQUES– SCENARIO 0

A retenir
Investissement faible, à porter par les promoteurs : 4,5 €/m² (soit 300 €/logement environ).
Coût complet de l'énergie en moyenne sur 25 ans : 136,8 €/MWh (soit 5,2 €/an/m²).

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.3.3. Analyse des résultats : indicateurs environnementaux

Bilan environnemental	
Consommation d'énergie primaire (MWhep/an)	6 385
Consommation d'énergie finale (MWhef/an)	4 248
Part d'EnR sur le bilan global	15%
Ratio de consommation des ressources (Ep/Conso)	126%
Émissions de GES (t eqCO_2 /an)	949
Émissions de SO_2 (t/an)	1
Émissions de NOx (t/an)	1
Déchets nucléaires TFA - FA - MA (kg/an)	42
Déchets nucléaires HA (kg/an)	8

FIGURE 51 : RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX – SCENARIO 0

A retenir
Emissions de GES modérées : 979 Teq CO_2/an, soit 7,1 kgeq CO_2/m²/an (car les besoins énergétiques sont intrinsèquement faibles)
Taux d'EnR : 15 % (uniquement dû aux prélèvements de calorie/frigories des PAC air/air des bureaux et activités).

6.3.4. Mise en œuvre

La mise en œuvre de ce scénario est très classique, dans le sens où chaque entité fonctionne de manière indépendante : chaque bâtiment de logement possède sa chaudière gaz collective, chaque plateau de bureau a sa PAC dédiée. L'investissement est donc porté par le promoteur, qui inclut ce coût dans le prix de vente du bâtiment.

6.3.5. Synthèse du scénario

Ce scénario de référence se distingue donc par des investissements dans les systèmes énergétiques plus faibles que les autres scénarios, mais une forte dépendance aux énergies non renouvelables disponibles sur les réseaux nationaux.

Les performances environnementales du scénario sont totalement dépendantes des réseaux nationaux électrique et gaz. Ce scénario ne répond donc pas aux ambitions environnementales de la ville de Paris et du futur Plan Climat.

6.4. Scénario 1 – CPCU

6.4.1. Présentation du scénario

Le raccordement au CPCU est possible et permet de couvrir l'ensemble des besoins de chaleur (chauffage et ECS) de la ZAC Chapelle Charbon. Les besoins de froid ponctuels des bureaux et activités sont assurés par des groupes froid.

Ce scénario, dans l'état actuel de l'avancement du projet, a été discuté avec le CPCU, qui a validé la faisabilité technique.

Scénario	Programme	Chauffage	ECS	Froid	Electricité
CPCU	Habitat collectif	CPCU		-	-
	Bureaux	CPCU		Groupe froid	-
	Activités	CPCU		Groupe froid	-

FIGURE 52 : DESCRIPTION – SCENARIO 1

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.4.2. Analyse des résultats : indicateurs économiques

L'investissement global de ce scénario est beaucoup plus important que le scénario de référence. Cet investissement est en très grande partie lié au réseau de chaleur en tant que tel (les systèmes de production de froid étant quasiment négligeables dans ce bilan).

Bilan économique	
Investissement total (€ TTC)	3 352 584
Coût de l'énergie moyen (€ TTC/MWh)	114,9
Entretien moyen (€ TTC/MWh)	2,7
Maintenance moyen (€ TTC/MWh)	2,0

FIGURE 53 : RESULTATS ECONOMIQUES– SCENARIO 1

Le coût moyen de l'énergie de ce scénario est inférieur à celui du scénario de référence. Cela s'explique par la part importante des énergies renouvelables dans le mix du CPCU. En fonction de la mutation du mix énergétique et du déploiement du CPCU, l'hypothèse d'évolution de 2 % par an devra éventuellement être revue à la hausse ou à la baisse.

	Quantité			Coûts	
	Puissance MW	DN	linéaire m	%	€
Raccordement vapeur	**3MW**	**100**	**50**		**135 000 €**
Station d'échange vapeur/eau *Process + aménagement intérieur+ utilités* *local mis à disposition dans bâtiment*	**3MW**				**300 000 €**
Réseau eau chaude *dont frais voirie* *coût hors frais voirie*		**125**	**1000**	18%	**1 900 000 €** *342 000 €* *1 558 000 €*
Total					**2 335 000 €**
Total hors frais voire					**1 993 000 €**

FIGURE 54 : DETAILS DES COUTS ESTIMES PAR LE CPCU

Le CPCU a mené une étude sur le projet permettant d'appréhender investissements nécessaire pour un tel raccordement.

Il est évident que le CPCU et l'aménageur doivent travailler de concert pour mener à bien ce projet. Les interfaces entre le réseau de chaleur et l'aménagement de la ZAC sont nombreuses, il est donc important de prévoir en amont la répartition des compétences et des coûts. Le réseau de chaleur devra notamment être phasé avec les autres travaux de voiries, portés par l'aménageur.

A retenir

Investissement important, à répartir entre les promoteurs, l'aménageur et le CPCU : 25,2 €/m² (soit environ 1600 €/logement).
Coût complet de l'énergie en moyenne sur 25 ans : 119,6 €/MWh (soit 4,55 €/an/m²).

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.4.3. Analyse des résultats : indicateurs environnementaux

Bilan environnemental	
Consommation d'énergie primaire (MWhep/an)	3 714
Consommation d'énergie finale (MWhef/an)	4 972
Part d'EnR sur le bilan global	55%
Ratio de consommation des ressources (Ep/Conso)	73%
Émissions de GES (t eqCO_2 /an)	867
Émissions de SO_2 (t/an)	0,3
Émissions de NOx (t/an)	0,6
Déchets nucléaires TFA - FA - MA (kg/an)	16,2
Déchets nucléaires HA (kg/an)	3,2

FIGURE 55 : RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX – SCENARIO 1

Le contenu carbone du CPCU (172 kgeqCO2/kWh) reste relativement élevé. Le gain environnemental sur les émissions de GES est donc peu important (-9 % par rapport au scénario de référence). Cela reste donc éloigné de l'objectif de neutralité carbone souhaité par le plan climat de la ville de Paris.

La part d'énergie renouvelable est quant à elle largement améliorée : 55 % d'EnR au lieu de 15 % pour le scénario de référence.

Cependant, il est a noté que pour l'aspect environnemental, la ZAC est complètement dépendante des performances du CPCU (qui tend par ailleurs vers un mix énergétique sollicitant d'avantages les EnR et avec un contenu carbone réduit).

A retenir

Emissions de GES modérées : 867 Teq CO_2/an, soit 6,5 kgeq CO_2/m²/an

Taux d'EnR : 55 % (part EnR du CPCU).

6.4.4. Mise en œuvre

Le déploiement de ce scénario implique la mise en place d'un réseau de chaleur à l'échelle de la ZAC (éventuellement en 2 phases d'aménagement), ainsi qu'une sous-station primaire. Cette sous-station permet de passer du régime de température du CPCU (vapeur surchauffée) au régime du réseau de la ZAC (réseau eau chaude basse température). Si la puissance de cette sous-station primaire est inférieure à 2 MW, elle peut être intégrée au volume de l'un des bâtiments de la ZAC. Dans le cas contraire, un bâtiment spécifique sera nécessaire.

A priori, pour l'ensemble de la ZAC, la puissance de chaud dépasse cette limite de 2 MW, il faut donc prévoir une emprise dédiée pour la sous-station primaire, ou bien prévoir 2 sous-stations de puissance unitaire inférieure à 2 MW qui pourront alors être intégrées aux bâtiments de la ZAC.

Dans le cas d'une mutualisation avec le projet Hébert, il devient difficile d'éviter la création d'une sous-station primaire en site propre.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

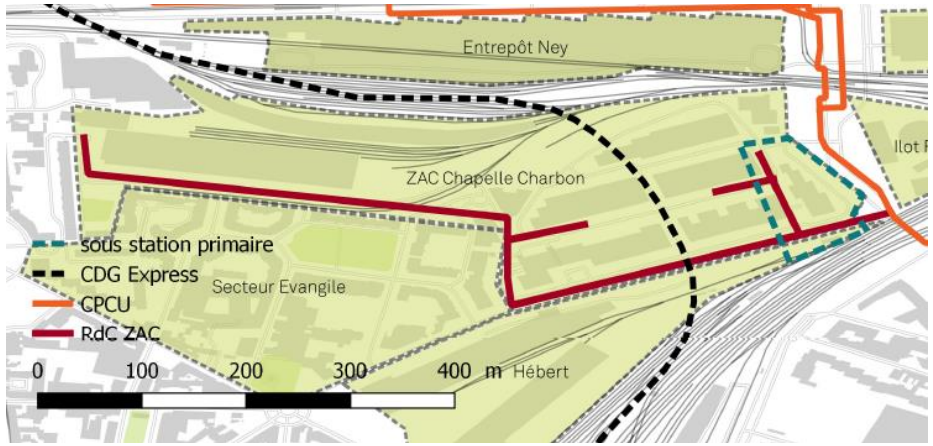


FIGURE 56 : ZONE PRIVILEGIEE POUR L'IMPLANTATION D'UNE SOUS-STATION PRIMAIRE

La zone à l'est de la ZAC, au plus proche du réseau actuel du CPCU est la plus pertinente pour positionner une sous-station primaire. Car il est plus aisé techniquement et moins couteux de réaliser un réseau d'eau chaude qu'un réseau de vapeur surchauffée.

Les frais liés au réseau de chaleur se répartissent entre les promoteurs (sous-stations secondaires dans les bâtiments), l'aménageur et le CPCU (à répartir pour couvrir les frais de voirie, d'infrastructure, de sous-station primaire).

Le tracé du futur réseau de chaleur sur la ZAC Chapelle Charbon implique nécessairement un point de croisement avec le Charles de Gaulle Express. Afin de limiter les surcoûts de travaux liés à cette complexité, il est important d'anticiper ce point singulier, en installant par exemple un tronçon du réseau de chaleur en ce point avant le déploiement complet du réseau.

Du point de vue technique, ce croisement entre les voies du CdG Express et le réseau de chaleur peut se faire aussi bien lorsque les voies ferrées sont enterrées ou aériennes.

6.4.5. Synthèse du scénario

Malgré la proximité du CPCU, les coûts de travaux restent importants.

Le coût de la chaleur pour les usagers est réduit par rapport au scénario de référence. Il sera nécessaire d'approfondir les coûts à l'investissement (quelles optimisations possibles ?) et le prix de la chaleur dans le futur (quel mix énergétique pour le CPCU dans 10 ans ? et quel prix de la chaleur ?) avoir une meilleur visibilité des coûts à venir.

Il est par ailleurs possible d'envisager un raccordement du projet Hébert au CPCU en même temps que la ZAC Chapelle Charbon, ce qui pourrait permettre de mutualiser une partie des coûts fixes et ainsi de rendre plus intéressant ce scénario.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.5. Scénario 2 – Géothermie superficielle et solaire hybride

6.5.1. Présentation du scénario

Ce scénario se base sur les données géothermiques disponibles sur le portail du BRGM. Il sera primordial d'effectuer un forage test pour connaitre la capacité de production réelle de la nappe sur le site.

Ce scénario valorise la présence d'une nappe souterraine sur le site. L'utilisation de PAC eau/eau réversibles permet de produire une partie des besoins de chaud (chauffage et ECS) ainsi que les besoins de froid.

Deux forages seront nécessaires (un par phase), pour satisfaire au mieux les besoins énergétiques de la ZAC.

Il est prévu de distribuer l'eau captée dans 2 boucles d'eau tempérée (une par forage et donc par phase), qui permet d'alimenter les PAC situées sur chaque ilot. Chacun des locaux techniques est équipé d'un ballon de stockage (qui permet d'augmenter le taux de couverture des PAC) et d'un appoint pour assurer la production de chaleur lors des appels de puissance hivernaux.

En plus de cette installation de production, des panneaux solaires hybrides permettent de couvrir 50 % de l'ECS des logements (et ils assurent également une production électrique).

La localisation du forage n'a que peu d'importance. Il est préférable que ce dernier soit proche du tracé de réseau le plus court possible pour limiter les investissements, mais ce sont les forages test qui permettront de déterminer le meilleur emplacement pour chaque phase d'aménagement.

Scénario	Programme	Chauffage	ECS	Froid	Electricité
Géothermie superficielle et solaire hybride	Habitat collectif	Géothermie + gaz	Géothermie + solaire hybride	-	Solaire hybride
	Bureaux	Géothermie + gaz	Ballon électrique	PAC sur nappe	-
	Activités	Géothermie + gaz	Ballon électrique	PAC sur nappe	-

FIGURE 57 : DESCRIPTION – SCENARIO 2

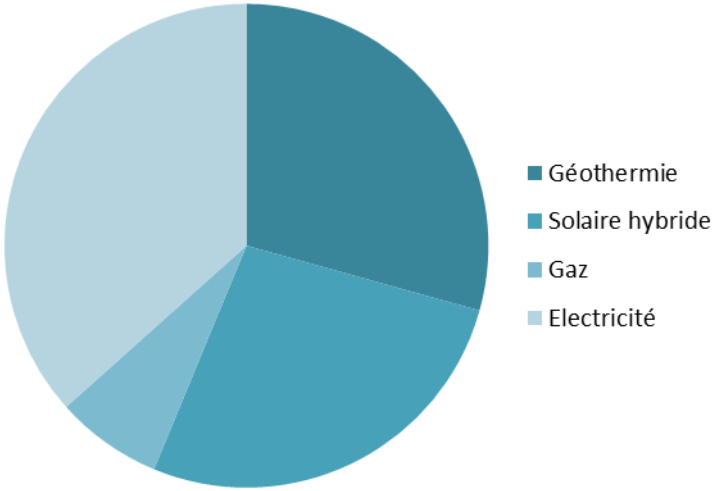


FIGURE 58 : MIX ENERGETIQUE – SCENARIO 2

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.5.2. Analyse des résultats : indicateurs économiques

Ce scénario implique un surinvestissement très important.

Les économies réalisées à l'exploitation sur la fourniture d'énergie permettent d'espérer un coût complet moyen de l'énergie de 48,9 €TTC/MWh, soit 1,9 €TTC/m²/an.

Bilan économique	
Investissement total (€ TTC)	7 624 166
Coût de l'énergie moyen (€ TTC/MWh)	36,2
Entretien moyen (€ TTC/MWh)	4,9
Maintenance moyen (€ TTC/MWh)	7,7

FIGURE 59 : RESULTATS ECONOMIQUES– SCENARIO 2

A retenir

Investissement très important, à porter par les promoteurs et l'aménageur (ou le futur délégataire du réseau) : 57,3 €/m² (soit 3700 €/logement). Pour déployer cette solution, une alternative peut être de passer par une délégation de service public avec investissement et exploitation. Cela permettra de faire porter l'investissement à une tierce partie, qui se rémunèrera lors de l'exploitation de l'installation.

Coût complet de l'énergie en moyenne sur 25 ans : 48,9 €/MWh (soit 1,9 €/an/m²).

6.5.3. Analyse des résultats : indicateurs environnementaux

Bilan environnemental	
Consommation d'énergie primaire (MWhep/an)	4 561
Consommation d'énergie finale (MWhef/an)	3 477
Part d'EnR sur le bilan global	67%
Ratio de consommation des ressources (Ep/Conso)	64%
Émissions de GES (t eqCO_2 /an)	536
Émissions de SO_2 (t/an)	1
Émissions de NOx (t/an)	1
Déchets nucléaires TFA - FA - MA (kg/an)	44
Déchets nucléaires HA (kg/an)	9

FIGURE 60 : RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX – SCENARIO 2

La géothermie permet d'augmenter le taux d'énergie renouvelable de manière importante et de limiter les émissions de GES. Le solaire hybride permet également de contribuer à cette performance environnementale.

A retenir

Emissions de GES faibles : 536 Teq CO_2/an, soit 4 kgeq CO_2/m²/an

Taux d'EnR : 67 %

6.5.4. Mise en œuvre

Le scénario implique 2 échelles : la ZAC et le bâtiment. Les forages géothermiques sont mutualisés par phase et l'eau tempérée est distribuée dans chaque bâtiment. Puis à l'échelle du bâtiment, une PAC permet de produire du chaud et du froid, avec un complément du solaire hybride pour l'ECS ainsi qu'une production électrique qui peut être autoconsommée ou vendue.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.5.5. Synthèse du scénario

Malgré un investissement très important, ce scénario énergétique permet d'amener de réels bénéfices :

- économiques d'une part (un coût de l'énergie faible pour les usagers)
- et environnementaux d'autre part (limitation des émissions de GES et taux d'EnR important).

La principale interrogation de ce scénario réside dans le potentiel réellement disponible en sous-sol. Avant d'aller plus loin sur cette piste, il est nécessaire de réaliser un forage test pour connaitre le potentiel réel, ce qui permettra d'obtenir des estimations financières plus précises et donc de mieux maitriser la pérennité du projet.

Toutefois, les besoins de froid relativement faibles (absents de la phase 1 et limités sur la phase 2) ne permettent pas de tirer le meilleur profit de l'installation géothermique et donc de l'investissement qui est nécessaire.

Une des pistes à envisager pourrait être la mutualisation d'un réseau de froid avec le projet Hébert pour apporter un débouché supplémentaire lors de la période estivale pour la production de froid.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.6. Scénario 3 – CPCU et solaire hybride

6.6.1. Présentation du scénario

Ce scénario reprend le scénario 1, en ajoutant une production complémentaire par le solaire hybride. A l'échelle de la ZAC, le solaire hybride est prévu pour couvrir 50 % des besoins annuels d'ECS.

Mais dans le cas d'une réflexion plus large (incluant d'autres consommateurs sur le réseau de chaleur), il est envisageable de déployer une surface plus importante de panneaux solaires hybrides ou thermiques pour apporter un complément de production au réseau de chaleur. Cependant, cela implique une servitude d'accès pour que le gestionnaire du réseau de chaleur puisse gérer et entretenir ces systèmes de production comme n'importe quel moyen de production raccordé au réseau de chaleur.

Comme pour le scénario 1, les besoins de froid sont assurés par des groupes froid.

Scénario	Programme	Chauffage	ECS	Froid	Electricité
CPCU et solaire hybride	Habitat collectif	CPCU	CPCU + solaire hybride	-	Solaire hybride
	Bureaux	CPCU		Groupe froid	-
	Activités	CPCU		Groupe froid	-

FIGURE 61 : DESCRIPTION – SCENARIO 3

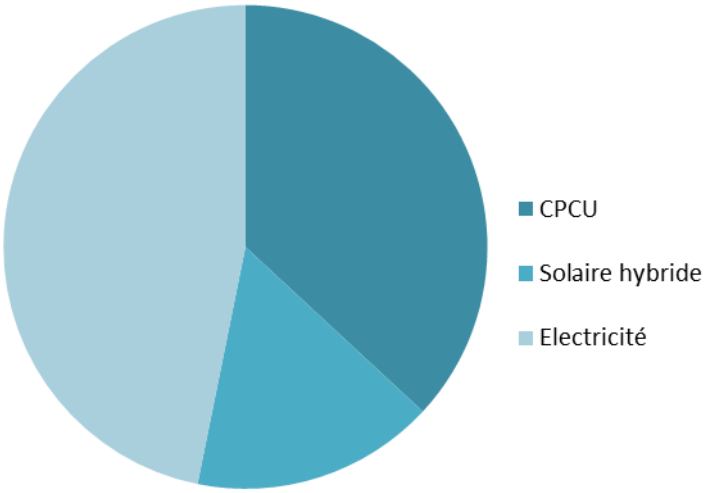


FIGURE 62 : MIX ENERGETIQUE – SCENARIO 3

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.6.2. Analyse des résultats : indicateurs économiques

Les panneaux solaires hybrides, largement déployés, impliquent un fort surcoût, à la charge des promoteurs.

Mais ce complément permet de faire baisser le prix moyen de l'énergie par rapport au scénario 1 (95,1 €TTC/MWh au lieu de 140,6 €TTC/MWh).

Bilan économique	
Investissement total (€ TTC)	7 127 232
Coût de l'énergie moyen (€ TTC/MWh)	82,1
Entretien moyen (€ TTC/MWh)	3,5
Maintenance moyen (€ TTC/MWh)	9,5

FIGURE 63 : RESULTATS ECONOMIQUES– SCENARIO 3

A retenir

Investissement important, à porter par les promoteurs, l'aménageur et le CPCU : 53,6 €/m² (soit 3500 €/logement environ)

Coût complet de l'énergie en moyenne sur 25 ans : 95,1 €/MWh (soit 3,6 €/an/m²).

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

6.6.3. Analyse des résultats : indicateurs environnementaux

Bilan environnemental	
Consommation d'énergie primaire (MWhep/an)	3 076
Consommation d'énergie finale (MWhef/an)	5 334
Part d'EnR sur le bilan global	67%
Ratio de consommation des ressources (Ep/Conso)	56%
Émissions de GES (t eqCO_2 /an)	676
Émissions de SO_2 (t/an)	0,3
Émissions de NOx (t/an)	0,5
Déchets nucléaires TFA - FA - MA (kg/an)	16,2
Déchets nucléaires HA (kg/an)	3,2

FIGURE 64 : RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX – SCENARIO 3

Le solaire hybride permet d'améliorer sensiblement les performances environnementales par rapport au scénario 1, à la fois sur le plan des émissions de GES et le taux d'EnR.

A retenir
Emissions de GES modérées : 676 Teq CO_2/an, soit 5,1 kgeq CO_2/m²/an
Taux d'EnR : 67 %

6.6.4. Mise en œuvre

Comme pour le scénario 2, ce scénario implique 2 échelles : la ZAC et le bâtiment. Car les systèmes énergétiques sollicités sont conçus à ces échelles (à la ZAC pour le CPCU et au bâtiment pour le solaire hybride).

Cependant, dans le cas d'un raccordement d'autres consommateurs au réseau de la ZAC, il est possible d'envisager d'intégrer les panneaux solaires hybrides au CPCU au même titre qu'une autre installation de production de chaleur.

6.6.5. Synthèse du scénario

Le couplage du solaire hybride au réseau du CPCU implique un fort surcoût économique, mais permet d'améliorer sensiblement les performances environnementales.

Ce scénario trouve un intérêt notamment s'il est possible de mutualiser l'extension du CPCU avec le projet Hébert. Dans ce cadre, les panneaux solaires hybrides pourraient apporter un complément de chaleur plus important. Cela implique néanmoins que le CPCU puisse avoir un accès facile à l'ensemble des installations de production (alors que les panneaux sont répartis sur plusieurs toitures au sommet des bâtiments de logement). Dans cette hypothèse, il serait par exemple envisageable de regrouper tous les panneaux solaires hybrides sur le quai Ney, afin de centraliser la production thermique et électrique complémentaire, ce qui faciliterait la gestion par le CPCU.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

7. COMPARAISON DES SCENARIOS

7.1. Aspect économique

	Investissement (€TTC)	Investissement (€TTC/m²)	Investissement par logement (€/logement)	Surinvestissement par logement (€/logement)	Coût moyen complet de l'énergie (€/MWh)	Facture énergétique (€TTC/m²/an)
S0 - Référence	595 200 €	4,5 €	300,0 €	-	137 €	5,2 €
S1 - CPCU	3 352 584 €	25,2 €	1 600,0 €	1 300,0 €	120 €	4,6 €
S2 - Géothermie + Solaire Hybride	7 624 166 €	57,3 €	3 700,0 €	3 400,0 €	49 €	1,9 €
S3 - CPCU + Solaire Hybride	7 127 232 €	53,6 €	3 500,0 €	3 200,0 €	95 €	3,6 €

FIGURE 65 : BILAN ECONOMIQUE DES SCENARIOS

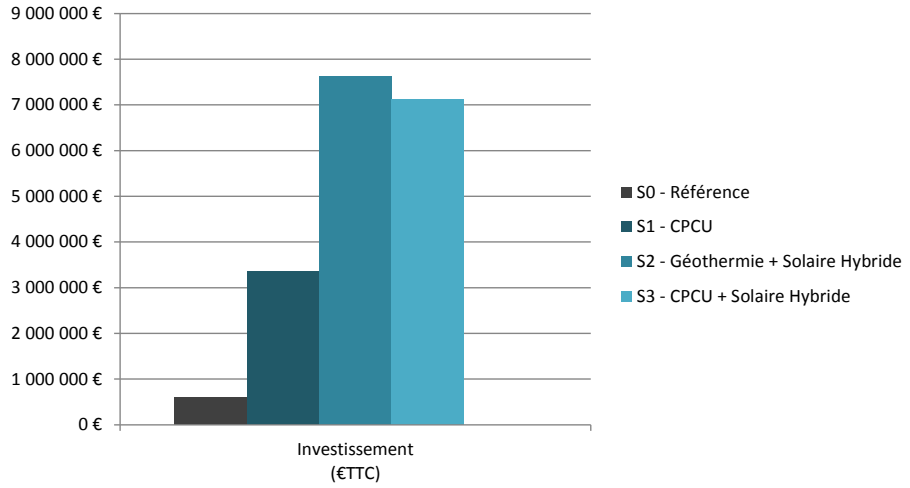


FIGURE 66 : INVESTISSEMENT DES SCENARIOS

A retenir

Les coûts ne sont pas portés par les mêmes acteurs. Les frais liés au réseau de chaleur et à la voirie sont à répartir entre l'aménageur et le délégataire du réseau de chaleur. Alors que les coûts des systèmes liés au bâtiment sont supportés par les promoteurs.

En cas de raccordement au CPCU, le prix de vente de la chaleur est fixé par le CPCU. Les usagers sont donc dépendant des variations de coût de production de la chaleur du CPCU.

L'hypothèse de variation prise pour l'étude (2 %/an de hausse moyenne) reste un des paramètres influent significativement sur les résultats. Cette hypothèse est à affiner en fonction des évolutions futures du réseau de chaleur (qui tend vers un mix sollicitant d'avantage les énergies renouvelables).

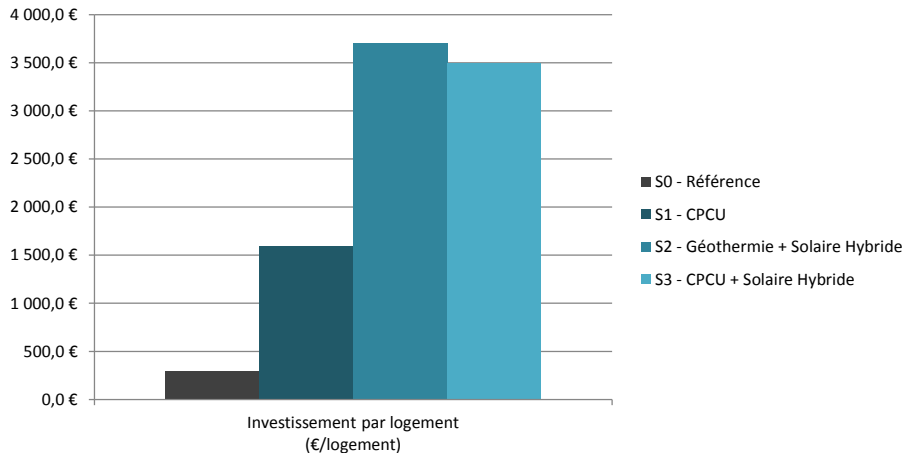


FIGURE 67 : INVESTISSEMENT PAR LOGEMENT

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

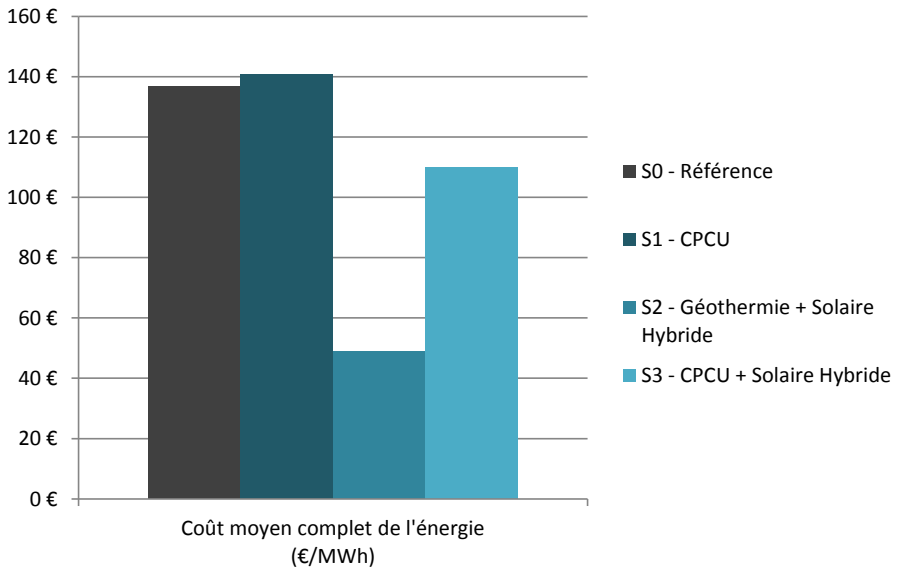


FIGURE 68 : COUT POUR LES USAGERS

7.2. Aspect environnemental

	Taux EnR (%)	Consommation EP (MWhEP/an)	Ratio EP/EF (%)	Emissions GES (T eq CO2/an)
S0 - Référence	15%	6 385	126%	949
S1 - CPCU	55%	3 714	73%	867
S2 - Géothermie + Solaire Hybride	67%	4 561	64%	536
S3 - CPCU + Solaire Hybride	67%	3 076	56%	676

FIGURE 69 : BILAN ECONOMIQUE DES SCENARIOS

A retenir

Intrinsèquement, les besoins énergétiques étant faibles, les impacts environnementaux sont restreints.

Le CPCU permet d'introduire de manière importante les EnR dans le mix énergétique, mais son contenu carbone relativement élevé (172 geq CO2/kWh, en comparaison, le gaz à un contenu de 234 geqCO2/kWh et l'électricité du réseau français environ 60 geqCO2/kWh)

L'évolution du mix énergétique du CPCU dans les prochaines années peut permettre de réduire le contenu carbone de la chaleur distribuée, mais il est difficile d'y contribuer à l'échelle de la ZAC Chapelle Charbon.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Le solaire hybride et la géothermie permettent d'améliorer significativement les performances environnementales.

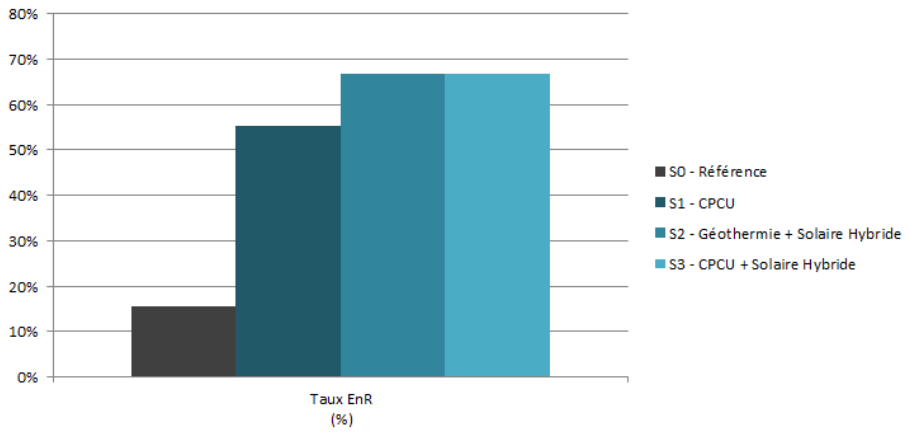


FIGURE 70 : TAUX D'ENR PAR SCENARIO

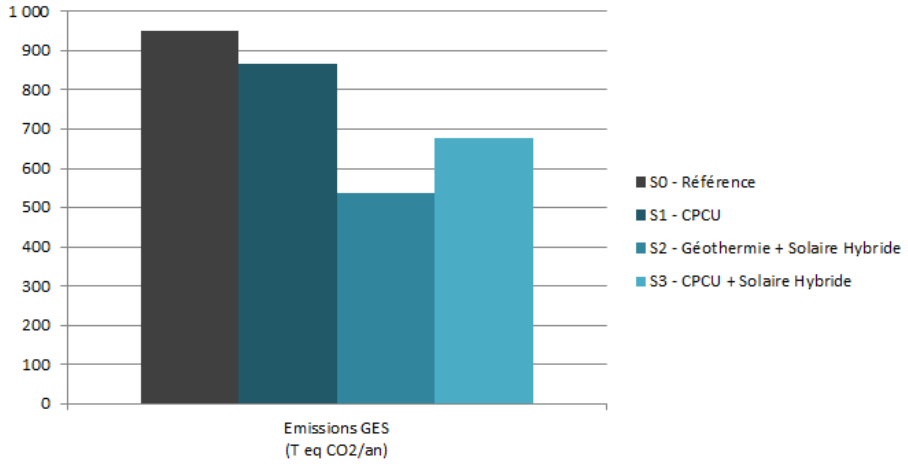


FIGURE 71 : EMISSIONS DE GES DES SCENARIOS

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

8. SYNTHESE

	Investissement (€)	Coût complet de l'énergie (€/MWh)	Taux EnR (%)	Emissions GES (T eq CO2/an)	Mise en œuvre	Elements favorables	Points de vigilance
S0 - Référence	600 000 €	137 €	15%	949	- Les systèmes énergétiques sont installés bâtiment par bâtiment. - L'investissement à totalement à la charge des promoteurs	- Faibles coûts d'investissement - Peu d'acteurs	- Moindre performance environnementale
S1 - CPCU	3 400 000 €	120 €	55%	867	- Le réseau du CPCU est déployer sur la ZAC avec la nécessité d'implanter une sous-station primaire - Les promoteurs ont la charge des sous-stations secondaires - L'investissement lié au réseau est à porter par le CPCU et l'aménageur	- Proximité du CPCU et capacité de réserve - Possibilité de mutualiser avec le projet Hébert	- Prix de vente de la chaleur dépendant du CPCU - Performance environnementale dépendant du CPCU
S2 - Géothermie + Solaire Hybride	7 600 000 €	49 €	67%	536	- 2 boucles d'eau tempérée (1 par phase) à la charge de l'aménageur ou du futur délégataire - Les PAC, les chaudières d'appoint et le solaire hybride sont à la charge des promoteurs	- Faible coût de la chaleur à l'exploitation - Performance environnementale	- Investissement très élevé - Nécessité de faire un forage test pour validé le potentiel réel disponible sur site
S3 - CPCU + Solaire Hybride	7 100 000 €	95 €	67%	676	- Le réseau du CPCU est déployer sur la ZAC avec la nécessité d'implanter une sous-station primaire - Les promoteurs ont la charge des sous-stations secondaires et du solaire hybride - L'investissement lié au réseau est à porter par le CPCU et l'aménageur	- Proximité du CPCU et capacité de réserve - Possibilité de mutualiser avec le projet Hébert	- Investissement très élevé - Prix de vente de la chaleur dépendant du CPCU - Performance environnementale dépendant du CPCU

FIGURE 72 : SYNTHESE DES SCENARIOS

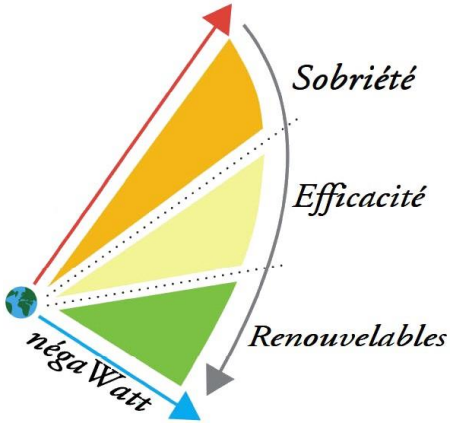
Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

9. FOCUS SUR L'ELECTRICITE

Dans les stratégies énergétiques, l'électricité est un besoin moins contraint que le chauffage, l'ECS et le froid. Le réseau électrique national français, robuste, fiable et équilibré, permet de subvenir aisément aux besoins électriques. Alors que la chaleur et le froid font appel à des ressources plus variées, dont le potentiel local peut restreindre la couverture.

Cependant, avec l'évolution des performances thermiques et le développement d'équipements électriques domestiques (TV, hi-fi, électroménager …), l'électricité représente la part majoritaire des consommations énergétiques dans le bâtiment neuf.

Pour réduire les consommations électriques, la démarche négaWatt permet de balayer hiérarchiquement l'ensemble des leviers.



9.1. Sobriété

9.1.1. Usages réglementaires

L'électricité consommée par les usages réglementaires est relativement réduite. Elle se répartie entre les auxiliaires de ventilation (ventilateurs), les auxiliaires de distribution des fluides (pompes pour le chauffage et l'ECS), l'éclairage et les éventuels besoins de systèmes pour la production de chaud, de froid ou d'ECS (pompes à chaleur, ballon électrique …).

La sobriété pour les usages réglementaires passe donc par :

- Des besoins de chauffage, d'ECS et de froid réduits : approche bioclimatique, enveloppe performante … C'est déjà le cas pour les bâtiments de la ZAC Chapelle Charbon.
- Un éclairage naturel optimisé dans les bureaux et les pièces de vie pour limiter le besoin d'éclairage artificiel. En complément, des systèmes de commandes optimisés peuvent permettre de limiter le besoin d'éclairage artificiel (détection de présence, gradation de lumière, cellule crépusculaire …).

9.1.2. Usages spécifiques

Pour les usages spécifiques, il est difficile d'agir à l'échelle de l'aménagement. Les besoins électriques étant induits par les usagers.

Dans les bâtiments, notamment pour les usages de bureaux, les prises peuvent être équipées d'interrupteurs. Cela permet de couper l'ensemble des équipements reliés à cette prise. Cela est particulièrement utile pour les bureaux : l'extinction des postes informatiques la nuit est facilitée. Un tel dispositif permet de ne pas avoir de consommation des appareils en veille.

Un livret d'accueil peut permettre de guider les usagers vers une utilisation plus sobre des équipements.

Une autre action qui peut être menée est un accompagnement ludique. Il existe par exemple le Défi Familles à énergie positive. Cela permet aux familles (ou entreprises) qui le souhaitent, de s'engager dans un processus de réduction de leur consommation énergétique. En se basant sur les factures réelles d'une année de référence, les familles essayent d'adopter un comportement permettant de réduire autant que possibles les consommations. Un classement est réalisé pour valoriser les

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

progressions les plus importantes. Un accompagnement est effectué au lancement, puis tout au long du défi, ce qui permet aux participants d'échanger avec des professionnels et également avec d'autres participants.

9.2. Efficacité

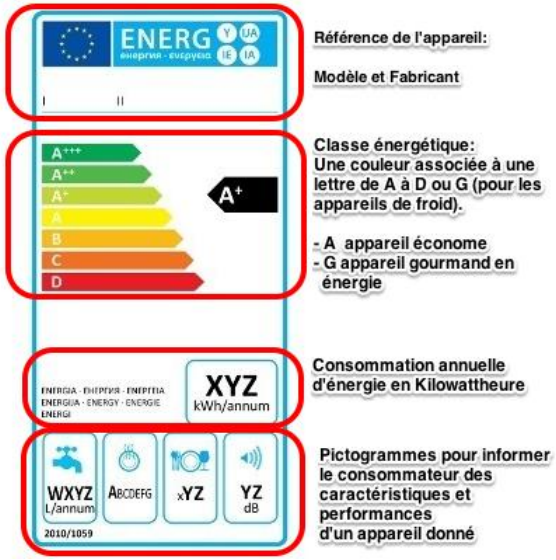
9.2.1. Usages réglementaires

L'efficacité des systèmes énergétiques pour les usages réglementaires est un choix qui se fait en phase conception de chaque bâtiment. L'aménageur peut imposer les classes énergétiques minimales à atteindre pour les différents équipements : pompes de circulation, ventilateurs, systèmes de production de chaleur et/ou de froid, calorifugeage des réseaux de distribution, LED …

9.2.2. Usages spécifiques

Il est beaucoup plus difficile de décliner l'efficacité des systèmes sur les usages spécifiques. Le principal levier est le pré-équipement des logements, pour s'assurer que de la performance énergétique des équipements.

Cependant, cela n'est pas toujours facile, les habitants possédant déjà certains équipements ou ayant des souhaits précis dans ce domaine.



9.3. Renouvelable

9.3.1. Production

La production d'électricité renouvelable est prévue dans les scénarios ayant recours au solaire hybride. Mais il est possible de déployer plus largement le solaire photovoltaïque sur les espaces publics ou sur les bâtiments.

Le potentiel solaire, estimé précédemment, représente 1400 MWh/an, soit environ un tiers des besoins électriques annuels.

9.3.2. Consommation, vente

Depuis le 9 Mai 2017, un nouveau cadre réglementaire est entré en vigueur. Il définit les tarifs de vente d'électricité photovoltaïque dans le cas de la vente totale ou de l'autoconsommation avec vente du surplus.

L'autoconsommation directe est désormais mieux encadrée du point de vue réglementaire.

Pour les logements :

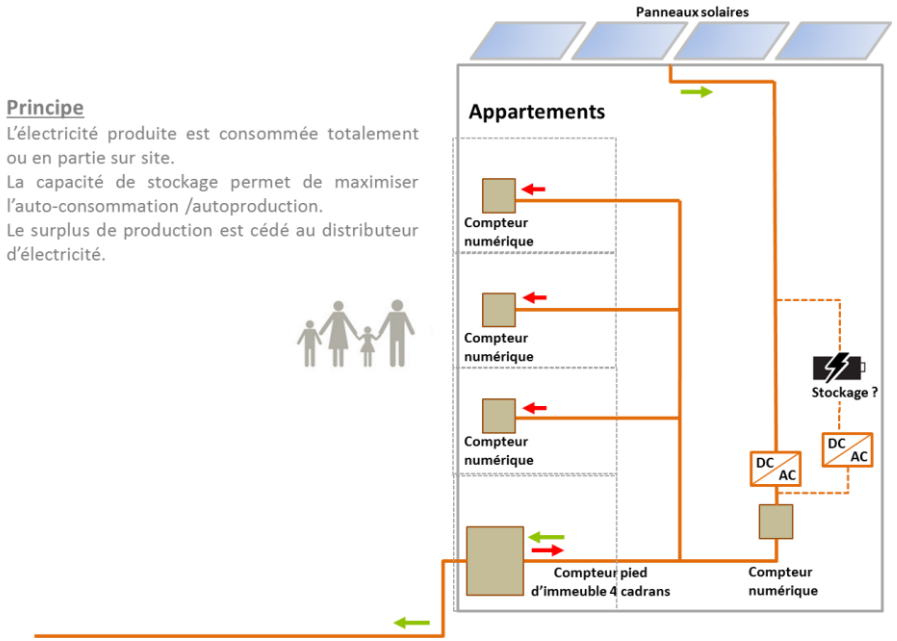
- La temporalité des courbes de consommation et de production est telle que le taux d'autoconsommation « naturelle » est relativement faible : le pic de production (en milieu de journée) correspond à une période de faibles consommations alors que le pic de consommation (en début de soirée) correspond à une période de faible production,
- Les tarifs heures pleines/heures creuses sont également peu favorables à l'autoconsommation partielle.

Pour les bureaux et activités :

- Une simultanéité naturelle entre la production et la consommation, donc un taux d'autoconsommation naturel relativement élevé,
- Des bâtiments régulièrement équipés de GTB/GTC, qui peuvent éventuellement permettre un pilotage de la courbe de consommation pour augmenter le taux d'autoproduction,

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

- Des tarifs de l'électricité relativement faibles (en fonction des contrats de fourniture d'électricité) la parité réseau n'est donc que très rarement atteinte pour ces conditions tarifaires.



Tarifs d'achat avec prime d'intégration au bâti (c€/kWh) - Vente en totalité

Type de tarif	Type de l'installation	Puissance totale (P+Q)	du 11/05/17 au 30/06/17
Tarif dit Ta	Intégration au bâti	≤3 kWc	18,7+4,5=23,2
		≤9 kWc	15,89+4,5=20,39
	Sur bâtiment et respectant les critères généraux d'implantation	≤3 kWc	18,7
		≤9 kWc	15,89
Tarif dit Tb	Sur bâtiment et respectant les critères généraux d'implantation	≤36 kWc	12,07
		≤100 kWc	11,5
		>100 kWc	0
-	au sol	-	0

FIGURE 73 : TARIFS AVEC VENTE TOTALE

Primes d'investissement (€/Wc) et tarifs d'achat - Vente en surplus

Type de tarif	Type de l'installation	Puissance totale (P+Q)	Prime à l'investissement (€/Wc) du 11/05/17 au 30/06/17	Rémunération de l'énergie injectée (c€/kWh)
Prime dit Pa	Sur bâtiment et respectant les critères généraux d'implantation	≤3 kWc	0,4	10
		≤9 kWc	0,3	10
Prime dit Pb		≤36 kWc	0,2	6
		≤100 kWc	0,1	6
		>100 kWc	0	0
-	au sol	-	0	0

FIGURE 74 : TARIFS AVEC AUTOCONSOMMATION ET VENTE DU SURPLUS

L'autoconsommation totale est également possible, mais dans ce cas, il faut s'assurer que l'installation de production n'injecte jamais d'électricité sur le réseau sous peine d'amende de la part du gestionnaire de réseau.

L'autoconsommation peut être envisagée aussi bien pour les logements que pour les bureaux et activités. Le choix de l'autoconsommation totale ou partielle avec vente du surplus doit se faire en fonction de la capacité de production de l'installation et de la courbe de charge des consommations électriques.

Le choix de l'autoconsommation est également à arbitrer en fonction des tarifs réglementaires et des tarifs de l'électricité au moment de la réalisation de l'installation.

9.3.3. Stockage

Le stockage peut permettre d'augmenter la capacité d'autoconsommation. Lorsque la production est supérieure à la consommation, au lieu de vendre ce surplus, il est possible de le stocker.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable

Plusieurs solutions existent pour le stockage : batteries, piles à combustible … Cependant, ces solutions sont encore très couteuses. L'intérêt du stockage est limité pour la ZAC Chapelle Charbon. Car même avec une couverture importante des surfaces disponibles par le solaire photovoltaïque, la consommation est telle que l'apport du stockage serait limité. De plus, dans un cadre urbain, ou le réseau électrique est très bien maillé, le surplus de production injecté sur le réseau sera consommé directement par un consommateur à proximité immédiate.

L'injection du surplus de production peu ainsi permettre de moins solliciter les installations de production du réseau électrique national, ce qui réduit leur impact environnemental.

L'intégration d'un système de stockage pourrait être justifiée dans le cadre d'une expérimentation ou une innovation.

Ce document est la propriété de Vizea. Il ne doit pas être reproduit, cité ou communiqué sans son accord préalable