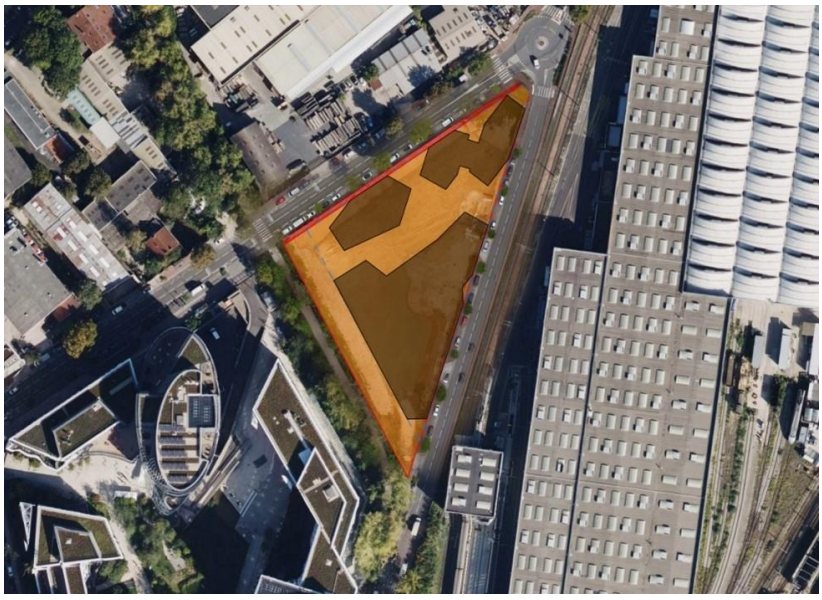
ETUDE D'IMPACT DU PROJET IMMOBILIER CHÂTILLON (CHÂTILLON, 92)

ETUDE DE FAISABILITE SUR LE POTENTIEL D'APPROVISIONNEMENT EN ENERGIES RENOUVELABLES DU SITE DU PROJET CHÂTILLON

Suite à la transmission de l'ETAT INITIAL le 31/07/2024



Date de mise à jour : Décembre 2024

INDICE 4 : Version mise à jour – Rédactrice : Léa FREY, Validation : Nicolas FOUBERT

Contenu

Table des matières

I. Périmètre de l'étude et objectifs 3
1. Le quartier 3
2. Le site du projet CHÂTILLON 3
3. Les enjeux énergétiques 5
II. Etude des besoins énergétiques propres à la zone 6
1. Méthode d'évaluation des besoins énergétiques 6
2. Méthode d'évaluation des puissances 7
3. Répartition des besoins énergétiques 8
4. Répartition des besoins en puissance 9
III. Energies renouvelables et fatales applicables 10
1. Etat initial des énergies renouvelables et fatales 10
2. Démarche En'R Choix 12
3. Perspectives d'intégration des énergies renouvelables 13
4. Composantes du mix énergétique 18
IV. Scénarii d'approvisonnement étudiés 19
V. Description détaillée des scénarii 20
1. Méthodologie 20
2. Description technique des scénarii 20
5. Production d'électricité par mise en place d'installations photovoltaïques 23
VI. Analyse comparative des scénarii 24
1. Méthodologie et hypothèses 24
a) Critères énergétiques 24
b) Critères économiques 24
c) Critère environnemental 25
2. Résultats / Comparaison Critères énergétiques 26
a) Consommations en énergie finale 27
b) Consommations en énergie primaire 28
c) Energie achetée 28
a) Taux d'approvisionnement en énergies renouvelables 29
3. Résultats / Comparaison Critères économiques 30
4. Résultats / Intégration du solaire photovoltaïque 31
5. Résultats / Critère environnemental d'impact Carbone 32
6. Synthèse des résultats 33
VII. Conclusion 34

I. Périmètre de l'étude et objectifs

1. Le quartier

Le projet, situé sur la commune de Châtillon (92), s'inscrit dans un territoire en profonde mutation. En effet, des opérations d'urbanisme de grande envergure sont au programme sur le territoire communal, notamment la ZAC des Arues à proximité directe de la parcelle (lisière nord). Ces aménagements ont pour but de faire évoluer le territoire, et contribuent à l'attractivité du quartier, en attirant aujourd'hui de nouvelles populations.

C'est dans ce cadre que la SAS les Ateliers est aujourd'hui maitre d'ouvrage du développement d'un projet de construction d'un programme mixte de logement, hébergement, commerces et activité de logistique.

Le projet CHÂTILLON EN QUELQUES CHIFFRES pour cette étude :

- Environ 0.6 ha de foncier
- SDP Totale de 28 000 m² environ dont :
  - 23 759 m² d'habitation (85%*) :
    - 16 074 m² de logements en accession/social (57%)
    - 7 685 m² d'hébergements (27%)
  - 2 082 m² de commerces (7%)
  - 1 974 m² d'entrepôt de logistique (7%) et 185 m² de bureaux associés (1%)

**** Pourcentage de la surface de plancher totale construite***

2. Le site du projet CHÂTILLON

Le site du projet d'une superficie d'environ 6 400 m², se situe au sud-est de la ville. De forme triangulaire, il est délimité par l'avenue de la République au nord, la rue Perrotin à l'est et la coulée verte à l'ouest.

Le projet s'implante sur une parcelle sur laquelle était présent un bâtiment sans intérêt patrimonial qui a été démoli (bâtiment de bureau / activités en R+2).

Cette zone est située au croisement de plusieurs dynamiques et échelles territoriales, que le projet doit articuler en termes de formes urbaines, programme et accès aux espaces publics.

Figure 1 : Le site dans le territoire

Cette opération de construction sera basée sur plusieurs axes complémentaires :

- Minimiser la perception de densité ;
- Offrir une perception élargie depuis l'espace public, en ouvrant le cœur d'ilot et en prolongeant la coulée verte ;
- Habiter et végétaliser les toitures ;
- Créer des connexions avec la ZAC des Arues et le campus Orange à proximité.

La programmation attendue dans le cadre du projet CHÂTILLON est majoritairement portée sur la construction de logements, mais aussi de commerces/activités. En effet, l'objectif du projet est de poursuivre la dynamique de changement déjà engagée sur le quartier via les points suivants :

- **Construction d'environ 440 unités d'habitation**, dont 57% de logements (parmi lesquels 25% de logement social), et 27% d'hébergement ;
- **Création de commerces et activités** en rez-de-chaussée et premiers niveaux.

Figure 2 : Plan masse – extrait du plan PPX.367_CHATILLON_REPUBLIQUE_PLAN DE TOITURE_20241213

Le projet de construction sera donc majoritairement composé de logements, ainsi que de commerces/activités.

La figure 3 ci-après détaille les surfaces projetées par plots du projet de construction CHÂTILLON.

	Logements*		Bureaux	Commerces de détail	Logistique urbaine	
Plots	***Nombre***	***SDP***	***SDP***	***SDP***	***SDP***	
A1	78	**4 978 m²**	**0 m²**	**513 m²**	**0 m²**	
A2	39	**2 577 m²**	**0 m²**	**267 m²**	**0 m²**	
B1	38	**2 622 m²**	**0 m²**	**873 m²**	**1 974 m²**	
C1	42	**2 718 m²**	**0 m²**	**0 m²**	**0 m²**	
C2	43	**3 179 m²**	**185 m²**	**0 m²**	**0 m²**	
D1	203	**7 685 m²**	**0 m²**	**430 m²**	**0 m²**	
TOTAL	443	**23 759 m²**	**185 m²**	**2 082 m²**	**1 974 m²**	**28 000 m²**

Figure 3 : Tableau récapitulatif des surfaces par plots

3. Les enjeux énergétiques

Quelles énergies et quels systèmes techniques associés pour alimenter 28 000 m² de bâti, principalement à usage de logements, à l'horizon 2035 ?

Comment intégrer une part significative d'énergies **renouvelables ou fatale** dans le mix énergétique propre à ce nouveau site ?

Quel est le choix le plus respectueux de l'environnement et le plus viable économiquement pour les opérateurs devant construire et s'installer sur le territoire ?

Ces 3 questions résument les principaux enjeux pour l'approvisionnement énergétique du projet CHÂTILLON.

ENJEUX ENERGETIQUES ET OBJECTIFS DE L'ETUDE :

- Comparer les solutions énergétiques exploitables sur le site de façon indépendante
- Identifier le mix énergétique intégrant les énergies renouvelables ou fatales disponibles sur la zone et économiquement viable
- Disposer d'un taux de couverture des besoins en énergie des bâtiments du site
- Définir les possibilités de planification voire de « montée en charge » du mix énergétique afin de pouvoir programmer les investissements concomitamment avec l'ordre d'entrée en jeu des opérateurs en charge de la construction des lots

* Pour les besoins de l'étude, le bâtiment D1 correspondant à la résidence services a été intégré au décompte des logements.

II. Etude des besoins énergétiques propres à la zone

1. Méthode d'évaluation des besoins énergétiques

Pour l'estimation des besoins énergétiques, nous utilisons en général les valeurs moyennes extraites d'études thermiques réalisées sur des opérations similaires avec des usages identiques.

Pour autant, il est à noter que la mise en place progressive de la RE2020, démarrée début 2022 pour les logements neufs et à partir de mi-2022 pour les activités tertiaires, impacte fortement la thermique des ouvrages et leurs besoins énergétiques.

Ainsi, au regard de la planification prévisionnelle de déploiement de l'opération de construction neuve du projet CHÂTILLON, celui-ci sera concerné par le seuil 2022 de la RE2020*.

LA RE2020 : VERS DES BATIMENTS A ENERGIE POSITIVE

Les Bâtiments à Energie Positive sont des bâtiments qui produisent plus d'énergie (électricité, chaleur...) qu'ils n'en consomment, en moyenne globale.

Si la RT2012 prend en compte uniquement 5 usages liés au bâtiment (Chauffage, Refroidissement, Production d'Eau Chaude Sanitaire, Eclairage et Auxiliaires dont pompes, ventilateurs…), la RE2020 prend en compte des usages supplémentaires liés aux appareils électriques et électroménagers ainsi qu'aux services généraux. Ce périmètre élargi permet de rapprocher les consommations théoriques des réelles.

Néanmoins, étant donné qu'il est régulièrement constaté un écart entre les études réglementaires et les consommations réelles des bâtiments en fonctionnement, une approche prudentielle a été observée pour l'évaluation des besoins : ainsi, une marge de correction par rapport aux valeurs issues des 1ers retours d'expérience des études thermiques réglementaires RE2020 a été prise. **Celle-ci représente environ +60% / consommations conventionnelles réglementaires converties en énergie finale.**

Les ratios de besoins énergétiques pris en compte pour les différents usages dans le cadre de la présente étude sont précisés dans le tableau ci-dessous.

(en kWhef/m²/an)	*Chauffage*	*Refroidissement*	*ECS*	*Eclairage*	*Ventilation*	*Auxiliaires*	Total
Logements collectifs	34	0	22	2	2	2	62
Education	23	19	0	10	11	2	65
Commerces	23	86	0	130	10	2	251
Culture	23	19	0	11	5	1	59
Bureaux	19	22	0	11	5	1	58

Figure 4 - Besoins en énergie finale ($kWh_{ef}/m^2/an$) utilisés pour les usages réglementaires

A noter que les besoins en ECS des locaux non résidentiels étant minimes, ils ont été considérés dans les différents scénarii comme négligeables. Ils vont en effet jouer un rôle anecdotique pour le dimensionnement et le choix des solutions techniques en énergie pour les zones non résidentielles et seront vraisemblablement traités par des solutions conventionnelles avec une réflexion sur la nécessité de disposer de systèmes à accumulation ou à production instantanée.

** donnée provenant de la MOA.*

2. Méthode d'évaluation des puissances

Afin de projeter les consommations et gains énergétiques des solutions techniques envisagées, il est nécessaire d'évaluer les besoins en puissance chaud et froid du site.

Ces valeurs sont dimensionnantes pour évaluer les capacités des équipements associés aux différents scénarii étudiés. En effet, l'affectation d'équipements techniques à chaque scénario permet ensuite la comparaison énergétique et économique des différentes solutions.

Les ratios utilisés pour **l'estimation des puissances appelées en chaud et en froid**, variables sur l'année, sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

W/m²	*Chauffage*	*Refroidissement*
Logements collectifs	48	0
Education	48	26
Commerces	67	43
Bureaux / Culture	48	26

Figure 5 – Ratios de puissance en W/m² utilisés pour les STD et adaptés

Ces ratios ont été adaptés à Châtillon en utilisant les degrés-jours unitaires chaud et froid de la station météo Paris Montsouris (station météo la plus proche).

A noter qu'une réévaluation des besoins en puissances propres à chaque bâtiment sera nécessaire lors des phases de conception, sur la base des caractéristiques précises des projets de bâtiments.

3. Répartition des besoins énergétiques

Les besoins énergétiques totaux pour les usages réglementaires de l'ensemble des opérations prévues sur le projet CHÂTILLON sont évalués à :

2 237 MWh pour les surfaces prises en compte dans l'étude

Si l'on considère seulement les besoins énergétiques requis pour le chauffage, le refroidissement ou le rafraichissement et l'ECS, les besoins évalués s'élèvent à :

1 616 MWh

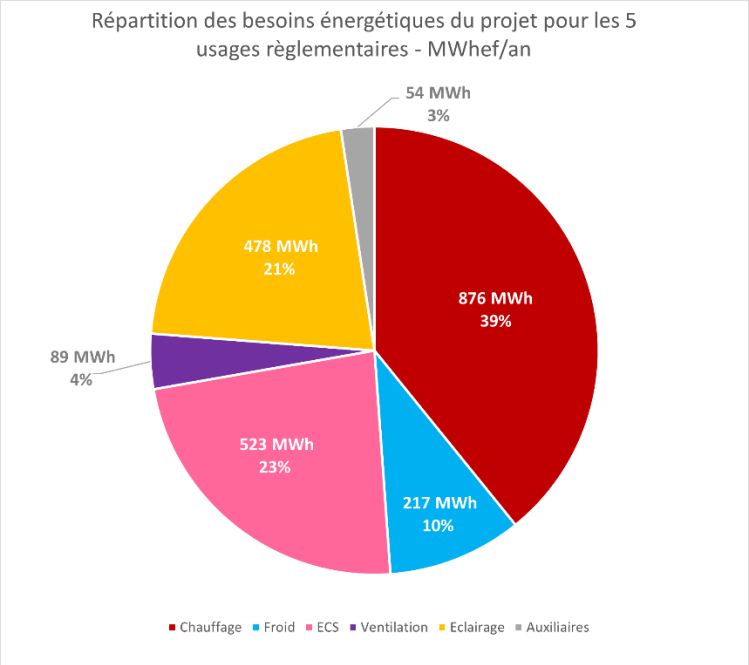


Figure 6 : Evolution des besoins énergétiques pour tous les usages réglementaires

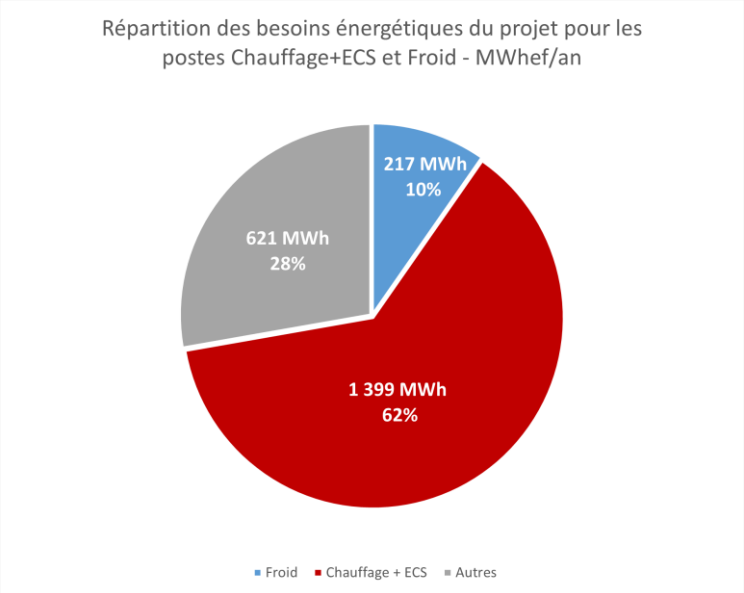


Figure 7 : Répartition des besoins énergétiques pour le chaud et le froid

Les besoins en chauffage et ECS sont prédominants. Ceci est lié à la programmation de l'opération puisque les surfaces de logements prévues sont majoritaires, et possèdent des besoins importants sur ces postes. A noter que la rigueur climatique de Châtillon peut influer sur les besoins en chaud notamment.

Par ailleurs, les besoins des postes Eclairage et ECS représentent également une part non négligeable d'environ 40% de la répartition.

4. Répartition des besoins en puissance

Les besoins en puissance, une fois l'ensemble des livraisons de l'opération réalisées, sont représentés sur les graphes ci-après.

Au total, les besoins en puissances atteignent environ **1 311 kW pour le chauffage et pour l'ECS**, et **175 kW en froid** pour l'ensemble des bâtiments du projet.

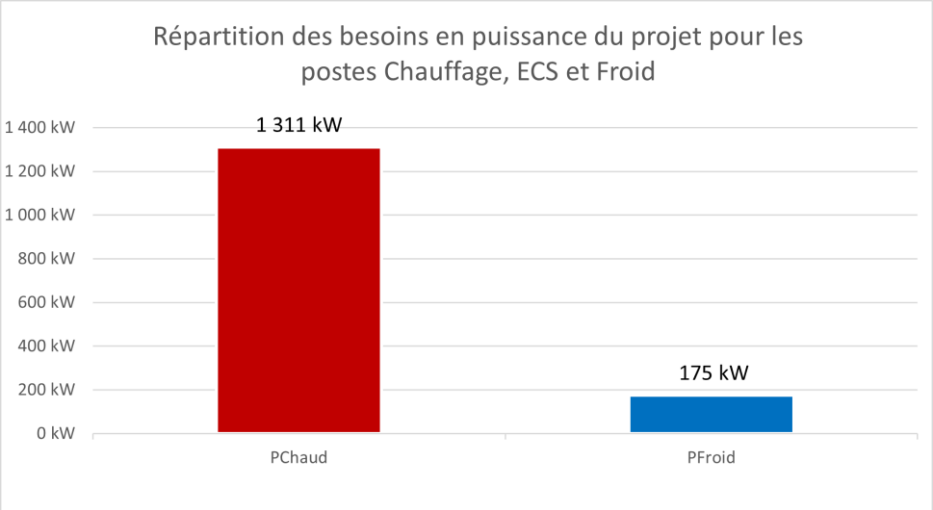


Figure 8 : Répartition de la puissance Chaud/Froid estimée pour l'ensemble du projet

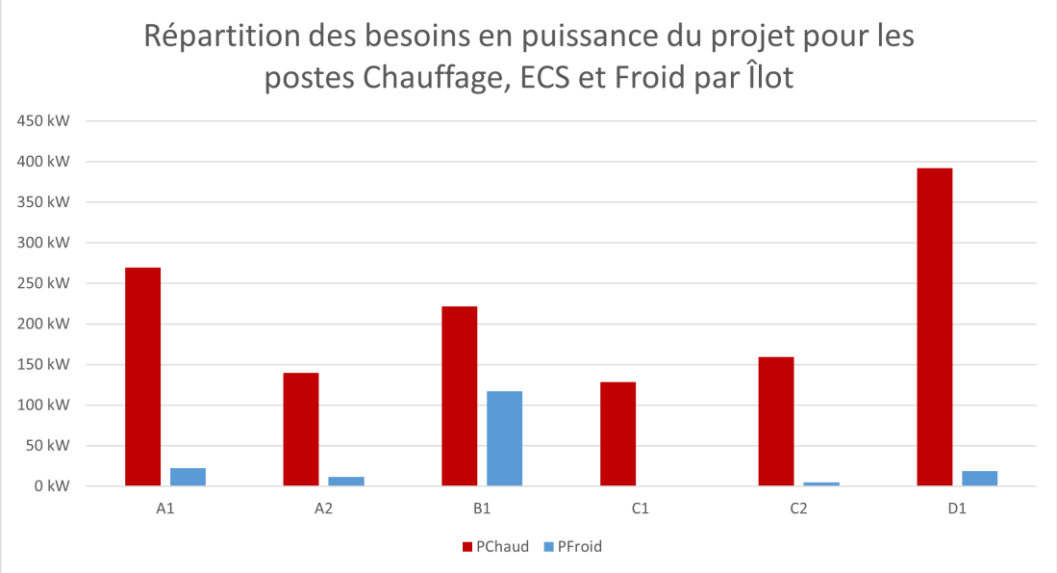


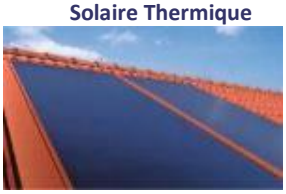
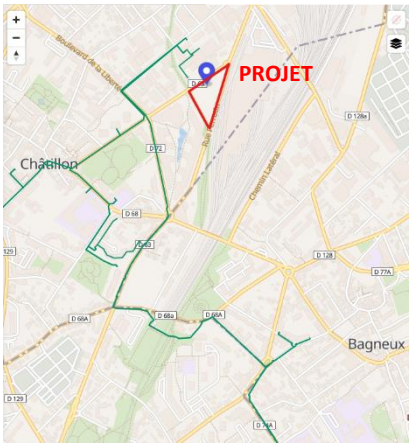
Figure 9 : Répartition par Îlot de la puissance Chaud/Froid estimée pour l'ensemble du projet

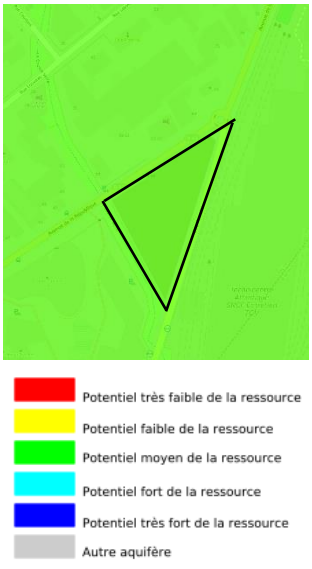
Sur base de la programmation de l'opération, les besoins en puissance Chaud estimés représentent environ 88 % des besoins totaux. Ces besoins sont majoritaires dans la répartition totale, ceci étant lié à la surface importante de logements. A contrario, les besoins en puissance Froid représentent une part faible des besoins totaux (environ 12%), du fait de la faible part de commerces et bureaux, seuls bâtiments de l'opération ayant des besoins en froid.

Rappel *: Une réévaluation des puissances propres à chaque opération sera nécessaire lors des phases de conception de Maîtrise d'œuvre, sur la base des caractéristiques précises des projets de bâtiments. C'est sur cette base là que le dimensionnement des équipements et des émetteurs associés pourra être effectué.*

III. Energies renouvelables et fatales applicables

1. Etat initial des énergies renouvelables et fatales

TYPE D'ENERGIE	CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE	APPLICABLE OU ADAPTE AU PROJET ?
Solaire Thermique 	**<u>L'irradiation solaire annuelle et des températures extérieures.</u>** **<u>Les contraintes d'inclinaison et d'orientation du matériel.</u>** **<u>Les éventuelles zones d'ombrage</u>** : arbres, bâtiments, reliefs naturels, …largement préjudiciables pour la production d'électricité **<u>Les aspects réglementaires :</u>** PLU, ZNIEFF (Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique), zones classées, zones Natura 2000, réserves naturelles, autorisation de la Directions générale de l'Aviation civile, … **<u>L'impact visuel :</u>** Afin de limiter les impacts sur le paysage, des techniques d'intégration existent et se développent progressivement pour offrir un panel de solutions plus étendu aux utilisateurs et une meilleure intégration architecturale.	**APPLICABLE** - Potentiel solaire **favorable.** - Une surface de toiture adéquate et un besoin en chaleur en font une énergie renouvelable à étudier.
Solaire Photovoltaïque 		**APPLICABLE** - Potentiel solaire **correct** (env. 1 150 kWh/kWp.an estimés). - Pas de contrainte réglementaire rédhibitoire. - Participation à la production décentralisée d'énergie et à la stabilisation du coût de l'énergie pour les usagers. - Possibilité d'autoconsommation collective. *Données issues du site Global Solar Atlas.*
Réseau de chaleur  *Carte des réseaux de chaleur existants – France Chaleur*	**<u>Présence d'un Réseau de chaleur (RCU) existant :</u>** - Distance au réseau raisonnable. - Compatibilité avec les besoins énergétiques à couvrir et la stratégie de développement du gestionnaire du réseau.	**NON APPLICABLE** Un réseau de chaleur est présent à moins de 100m du périmètre du projet : le RCU de **Bagneux-Châtillon** (9236C) basé sur une installation géothermique profonde au Dogger (57.4% ENR, 86 bâtiments raccordés et produisant env. 70 GWh/an). Néanmoins, le raccordement au RCU n'est pas possible dans la mesure où le concessionnaire (BAGEOPS) est dans l'impossibilité de raccorder de nouveaux bâtiments car il ne pourra pas respecter le taux d'ENR de 60% imposé par son mandataire (SIPEREC). *NB : réunion réalisée en mars 2024 entre le MOA et le concessionnaire.* *Données issues du site France Chaleur.*
Potentiel bois énergie 	**- <u>Un besoin énergétique constant.</u>** **- <u>Surface disponibles</u>** pour installer la **<u>chaufferie biomasse</u>** et le **<u>silo de stockage du bois</u>**, tous 2 devant être accessibles pour les livraisons. - L'établissement du compte d'exploitation prévisionnel.	**APPLICABLE SOUS RESERVE** - Potentiel en approvisionnement bois suffisant dans la région. - Voies routières importantes pour l'approvisionnement du combustible et pour les silos de stockage. **Cependant, le site est contraint et dispose de peu de surface libre disponible pour accueillir l'installation.**
Potentiel Hydraulique 	**Dénivelé et débit du cours d'eau ou du réseau d'eau potable** ou pression suffisante dans le réseau.	**NON APPLICABLE** Absence de réseau d'eau potable avec un dénivelé.

TYPE D'ENERGIE	CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE	APPLICABLE OU ADAPTE AU PROJET ?
Potentiel éolien 	**Le vent :** conditions de vent minimales acceptables 6 m/s en moyenne, soit 21 à 25km/h. **Le relief :** facteur important pour l'implantation d'une éolienne. Les sites à proximité d'obstacles (arbres, bâtiments, escarpements …) sont à proscrire car les vents y sont trop turbulents. **Les contraintes et servitudes** (cas de parc éolien) : Servitudes hertziennes, de captage d'eau, aériennes, radars, zones, servitudes de moyens de transports, contraintes environnementales, contraintes d'accessibilité… **L'impact visuel**	**NON APPLICABLE** Vitesses et puissance des vents insuffisants, vents irréguliers.
Potentiel maritime 	**Proximité de la mer (1,5 km**) – pour les échanges thermiques**.** **Thalassothermie pour production de chaleur** **Force de la houle pour la production d'électricité.**	**NON APPLICABLE** **Thalassothermie / Force de la houle** : L'opération se situe à une distance trop importante du bord de mer (env. 150 km) et par conséquent, la technique est inexploitable.
Potentiel de récupération d'énergie fatale 	- **Diamètre de conduite supérieur à 140 mm et débit minimal par temps sec de 12l/s** (soit un bassin versant de collecte supérieur à 1800 EH). - **Température initiale des eaux usées** supérieure. à 10°C - **Distance entre l'échangeur et l'unité de production d'énergie** inférieure à 250 m. - **Accessibilité de la canalisation d'assainissement.** - **Existence d'un tronçon rectiligne d'au moins 20m.** - **Raccordement des eaux usées sur réseau séparatif** au niveau du site.	**APPLICABLE SOUS RESERVE** Récupération de chaleur sur les eaux usées des logements : Les réseaux d'assainissement du site étant **unitaires** et non séparatifs, la récupération de chaleur fatale sur les eaux usées ne peut se réaliser que si la réfection des réseaux d'assainissement est prévue au programme de l'opération. Récupération de chaleur sur les effluents industriels : La récupération de chaleur fatale sur les équipements peut être appropriée. Toutefois, à ce stade le type d'activité industrielle et les équipements engagés ne sont pas connus. Cela n'en permet donc pas l'étude. ***Néanmoins, il pourra être intéressant d'étudier la récupération de chaleur fatale sur les effluents industriels dans le cadre des études de conception,*** selon la commercialisation effective de l'activité industrielle prévue au programme. *Données issues du site Opendata Hauts-de-Seine.*
Potentiel géothermique  *Carte du potentiel géothermique de surface du site – geothermies.fr*	**Caractéristiques du terrain :** Exposition au soleil, revêtement en dur (terrasse, piscine, etc.), présence d'un lit de sable, pente du terrain, Surface de terrain (entre 1,5 et 3 fois la surface chauffée). **Nature du sol**, place disponible pour l'installation des conduits. **Conductibilité thermique du sous-sol :** la puissance d'extraction lui est directement proportionnelle. Plus le sol est uniforme, plus la conductivité est élevée. **Humidité naturelle du sol :** elle améliore la conductibilité thermique et garantit un bon contact entre la sonde et le sous-sol. **Présence d'eaux souterraines :** Lorsqu'une sonde géothermique pénètre dans une nappe phréatique dont la vitesse d'écoulement excède quelques centimètres par jour, la quantité de chaleur qu'il est possible d'extraire augmente sensiblement.	**APPLICABLE SOUS RESERVE** **« Très basse énergie »** Le potentiel de ressources géothermales de surface **sur échangeur ouvert (nappe)** du site est moyen. Concernant la **géothermie sur échangeur fermé (sondes),** le site se situe dans une zone réglementaire éligible à la GMI avec avis d'expert. **« Basse énergie »** - Une installation de **géothermie profonde** est située à environ 1.5 km du site. - Sur le site du projet, la côte altimétrique du toit du Néocomien* est située à 740 m pour une température d'eau estimée à 35°C. Ainsi, une installation en doublet de forage serait pertinente. Toutefois, des contraintes pour ce type d'installation sont à prévoir : - Profondeur de forage importante. - Exportation de la chaleur à étudier/rentabilité. - Surface nécessaire environ 5 000 m². *Données issues du site Géothermies.*

TYPE D'ENERGIE	CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE	APPLICABLE OU ADAPTE AU PROJET ?
Potentiel aérothermique 	- Des **besoins en chaud ou froid** du projet. - La **température du milieu extérieur** (air ou eau).	**APPLICABLE** **Aérothermie :** Utilisation de Pompes à Chaleur réversibles Air/Eau ou Air/Air sur air extérieur pour la production de froid et/ou de chaud.
Potentiel d'utilisation de biogaz 	**Existence d'une unité de production de biogaz à proximité** directe ou possibilité sur site.	**NON APPLICABLE** **Pas d'unité de production de biogaz** à proximité *Données provenant de l'ADEME et du site ODRÉ.*

2. Démarche En'R Choix

En toute cohérence avec la démarche En'R Choix, la stratégie énergétique proposée pour le projet CHÂTILLON s'attachera à suivre les étapes suivantes :

Figure 10 : Démarche En'R Choix

Sobriété / efficacité énergétique - comme présenté en partie II. du présent document, les besoins énergétiques considérés pour les bâtiments à construire sont basés sur un niveau RE2020 (niveau 2022)

Mutualiser – un scénario possible de déploiement ou de raccordement à un réseau de chaleur urbain sera analysé

Optimiser et prioriser – le recours à d'autres énergies propres en complément (notamment solaire photovoltaïque et l'aérothermie) seront également intégrés

3. Perspectives d'intégration des énergies renouvelables

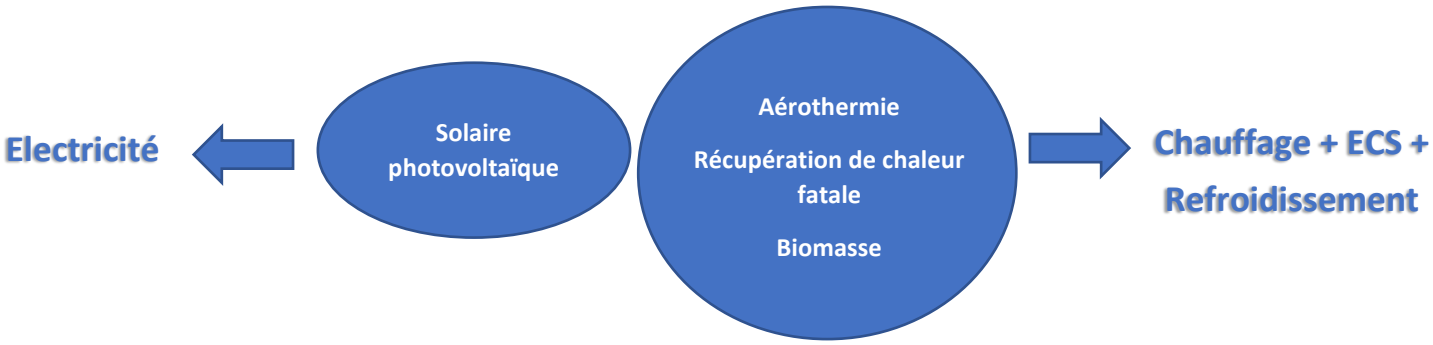
Sur la base des données disponibles à ce jour, les énergies renouvelables dont la disponibilité au niveau du site est la plus probable sont : le solaire photovoltaïque, l'aérothermie, la récupération de chaleur fatale sur les eaux usées des logements, et la biomasse.

- **Le solaire photovoltaïque** : L'aménagement du site doit nécessairement prendre en compte l'intégration d'une production électrique propre comme le solaire photovoltaïque. Ce système vient compenser la demande électrique supplémentaire et constitue une des solutions techniques en capacité de gérer de façon intelligente la demande électrique tout en pérennisant la fiabilité d'une partie du coût d'achat de l'énergie électrique.

- **Aérothermie** : Le potentiel aérothermique du site étant évident, l'étude se penchera donc sur une alimentation en chaud et froid par un système mixte thermodynamique avec des pompes à chaleur réversibles.

- **Récupération de chaleur fatale :** La récupération de chaleur sur les réseaux d'assainissement, à l'échelle de la strate d'habitation, sera étudiée. La densité de logement prévue au programme de l'opération permettra d'avoir un écoulement régulier d'eaux grises, à une température tempérée. Ce potentiel combiné à une technologie de pompe à chaleur Eau/Eau donne des systèmes à très haut coefficient de performance et en fond une solution d'approvisionnement en énergie renouvelable pertinente.

- **Biomasse :** De par la bonne disponibilité de cette ressource dans le département et la logistique d'accès à la ZAC, la mise en place d'un système de production de chaleur par bio-énergie (chaufferie biomasse), avec appoint gaz sera également étudiée.



A noter que bien que le potentiel géothermique du site soit favorable, la création d'un réseau de chaleur sur géothermie ne sera pas étudiée ici car ne nous semble pas pertinent, au regard des points suivants :

- *l'assiette énergétique annuelle est déséquilibrée entre les besoins chaud et froid du site, ce qui ne permet pas un amortissement raisonnable des coûts liés à la création d'un réseau collectif géothermique sur site (en effet, le Fond Chaleur impose notamment un critère de temps de fonctionnement minimum de 1500 h/an des installations, qui serait difficilement atteignable ici) ;*
- *le site dispose de peu de surface disponible pour accueillir l'installation.*

A noter également qu'à ce stade, le détail de la programmation de l'opération ne permet pas l'étude d'un système de récupération de chaleur fatale sur les équipements de l'activité de logistique/entreposage. ***Toutefois, nous recommandons d'étudier la faisabilité de cette récupération de chaleur fatale à l'échelle du bâtiment dans le cadre des études de conception.***

LE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

PRINCIPE GENERAL

L'énergie solaire est une énergie gratuite, abondante et renouvelable. Elle peut être utilisée de façon passive sans technologie particulière, si ce n'est des parois vitrées pour transmettre cette énergie à l'intérieur des bâtiments en hiver et ainsi limiter les besoins en chauffage.

L'énergie solaire peut ensuite être directement valorisée par des systèmes actifs pour la production d'électricité ; cette technologie est appelée « solaire photovoltaïque ».

TECHNIQUES EN JEU

- Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière, génère de l'électricité. En effet, « l'effet photovoltaïque" est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" comme le silicium utilisé pour les composants électroniques. Lorsque les particules de lumière viennent heurter ce matériau, elles communiquent une énergie à ses électrons. Ces derniers se mettent alors en mouvement créant un courant électrique recueilli par des fils métalliques très fins.

- Les cellules photovoltaïques peuvent être utilisées seules (montres, calculatrices…) mais la plupart du temps les cellules sont regroupées dans des **modules ou panneaux photovoltaïques**. Plusieurs modules sont ensuite associés pour donner un générateur photovoltaïque, plus ou moins grand en fonction du besoin déterminé.

- Il existe plusieurs familles de cellules photovoltaïques. Actuellement, les plus répandues sur le marché sont les **cellules en silicium cristallin** et les **cellules en couches minces, généralement en silicium amorphe**.

- Les panneaux installés peuvent être ou non raccordés au réseau public d'électricité. Dans l'affirmative, un onduleur convertit le courant continu produit par les modules en un courant alternatif monophasé ou triphasé compatible avec les normes du réseau électrique. Dans la négative, l'électricité est consommée sur place mais cela nécessite obligatoirement un stockage via des batteries représentant un coût non négligeable tant en termes d'achat que d'entretien.

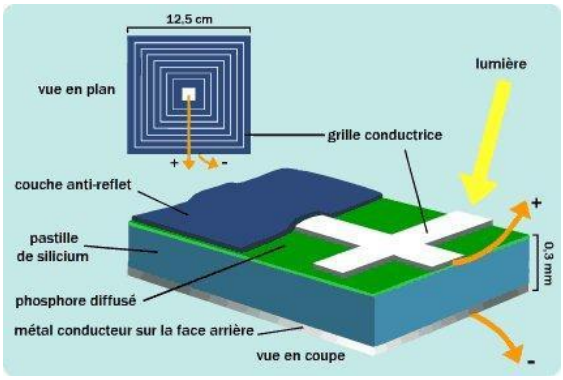


Figure 11 : Exemples d'installation PV

Dans le cas présent, c'est une **autoconsommation à l'échelle du projet** qui est envisagée, de façon instantanée par rapport à la production.

POTENTIEL AEROTHERMIQUE

L'**aérothermie** a pour principe thermique de récupérer les calories naturellement présentes dans l'air.

Cette énergie peut être utilisée avec deux technologies de **pompe à chaleur** : soit **air/eau** soit **air/air**.

La PAC fonctionne grâce à un fluide frigorigène qui y circule. Ce dernier puise l'énergie thermique dans l'air extérieur. Cela permet de le faire bouillir à une très basse température. Ainsi, la PAC produit de la vapeur qui va se transformer en chaleur à la suite de son passage dans le compresseur et le condenseur.

Les pompes à chaleur aérothermiques fonctionnent sur le principe thermodynamique de la réversibilité. En d'autres termes, une pompe à chaleur réversible peut réchauffer la pièce en hiver et la rafraîchir et la climatiser en été. Cette dernière, la climatisation aérothermique, puise les calories dans l'air intérieur afin d'extraire la chaleur et la rejeter dans l'air extérieur.

De plus l'aérothermie permet de produire du chauffage, de la climatisation, et de l'ECS efficacement.

Par ailleurs, la PAC aérothermique permet de réaliser des économies énergétiques comprises entre 50% et 70% par rapport à un chauffage électrique, et également des économies financières.

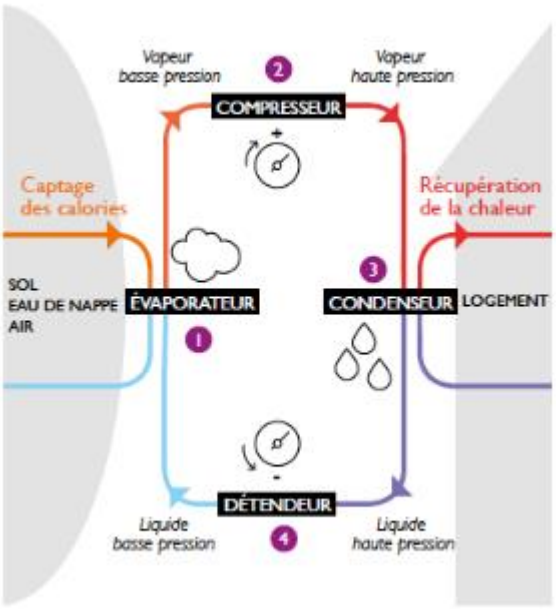


Figure 12 : Schéma fonctionnement PAC

RECUPERATION DE CHALEUR SUR LES EAUX GRISES

PRINCIPE GENERAL

La chaleur des eaux grises est une chaleur fatale, ce qui signifie qu'elle est produite par un procédé mais qu'elle n'est ni récupérée ni valorisée. Cette chaleur, qu'il est possible de valoriser, est considérée comme une énergie renouvelable, car son potentiel de récupération est constant.

Il existe 2 types de récupérateurs de chaleur sur les eaux grises :

- Les récupérateurs de chaleur sur eaux grises passifs : les calories contenues dans les eaux grises sont fournies à l'eau froide par un échangeur de chaleur.
- Les récupérateurs de chaleur sur eaux grises actifs : ils valorisent les eaux grises à l'aide d'une pompe à chaleur.

TECHNIQUES EN JEU

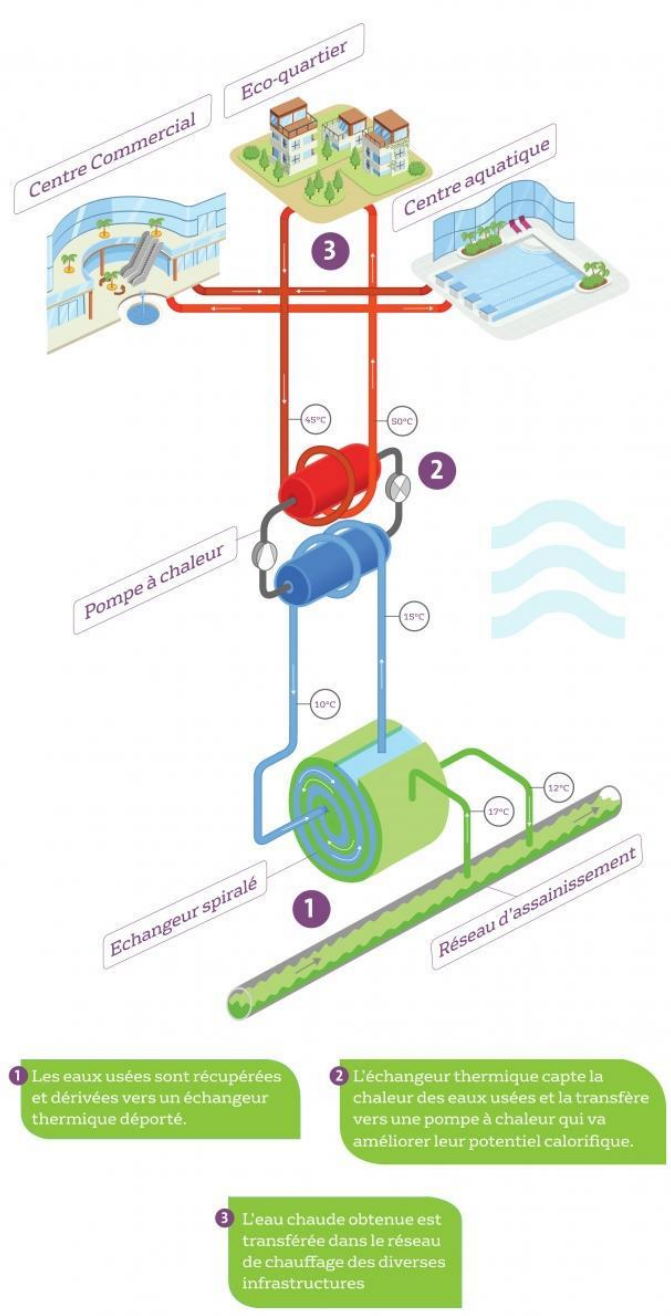


Figure 13 : Schéma de principe du procédé ENERGIDO - Veolia

Solution ENERGIDO : La solution retenue pour notre simulation est la solution ENERGIDO brevetée par Véolia.

Cette solution récupère les calories sur le réseau d'assainissement collectif du site ou du quartier via un échangeur. L'eau ainsi préchauffée va être acheminée vers une PAC Eau/Eau, qui va élever sa température jusqu'à un niveau permettant son utilisation dans un réseau d'eau tempérée, participant ainsi à la production de chauffage ou d'ECS du site.

POTENTIEL DE BOIS ENERGIE (BIOMASSE)

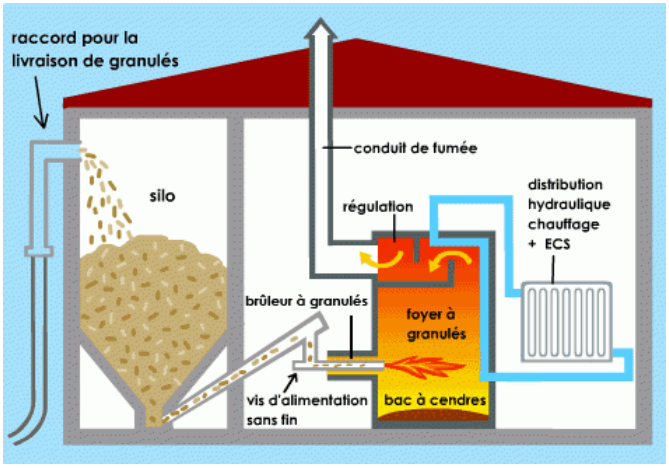
PRINCIPE GENERAL

La **biomasse** solide est majoritairement (92 %) destinée à produire de la chaleur, du fait d'un rendement supérieur à celui observé lorsqu'elle est utilisée pour produire de l'électricité. Il s'agit de l'énergie renouvelable la plus répandue en France dans le secteur résidentiel. À noter qu'à conditions climatiques données, la consommation moyenne de bois par logement utilisant cette énergie a tendance à diminuer, en raison notamment de l'amélioration de la performance des appareils.

Une chaudière biomasse est alimentée par des combustibles solides provenant de la filière bois. Cette technologie impose l'implantation d'un lieu de stockage (silo), ainsi que des voies routières accessibles par camion dans le cadre des livraisons.
Le bois est aujourd'hui une des sources d'énergie les moins chères parmi celles disponibles et son prix profite d'une stabilité dans le temps que ne possèdent pas les sources d'énergie fossiles et électriques.

La biénergie consiste à associer une chaufferie à combustible fossile (principalement gaz naturel) à la chaufferie bois. La chaufferie bois est conçue pour assurer la base des besoins énergétiques des bâtiments, elle fonctionne de façon plus continue à puissance nominale avec de meilleures performances énergétiques. La chaudière d'appoint, assure le complément de puissance pendant les périodes les plus froides de l'année, voire le secours en cas d'arrêt technique de la chaudière bois.
Une chaudière biomasse n'est jamais dimensionnée pour couvrir la totalité des besoins de chaleur. Le principe de la biénergie permet l'optimisation technique et économique des projets.

Figure 14 : Avantages de la biomasse



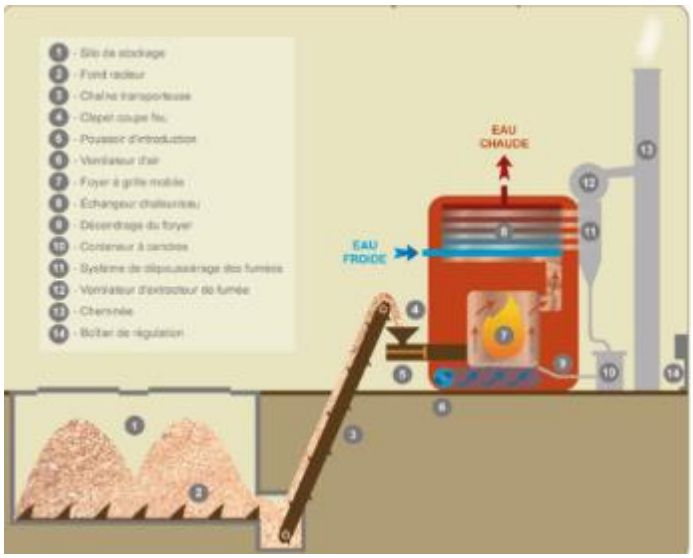


Figure 15 : Schémas de fonctionnement chaudière biomasse

A noter qu'en termes d'impact sanitaire, le recours à la Biomasse présente toutefois des limites puisque a un impact sur la qualité de l'air (émission de particules fines et CO2 notamment, liées à la combustion).

4. Composantes du mix énergétique

- **Le projet CHÂTILLON : l'opportunité pour un fonctionnement en réseau**

  Un réseau de chaleur ou un réseau tempéré est un ensemble d'installations qui produisent et distribuent de la chaleur ou de l'eau tempérée à plusieurs bâtiments pour répondre à leurs besoins en chauffage ou d'eau chaude sanitaire.

  La mutualisation et la centralisation de la production et/ou de la captation d'énergie permettent de réaliser des gains d'échelles importants et de diminuer les rejets atmosphériques (en gaz à effet de serre notamment).

  Sur le plan économique, les réseaux de chaleur ou réseaux tempérés sont globalement compétitifs grâce aux gains d'échelle qu'ils génèrent.

  Dans le cas présent, la réflexion sur les opportunités de mise en réseau des équipements de production ou de captation d'énergie est incontournable.

- **Des énergies renouvelables faisables techniquement, viables économiquement pour les opérateurs et acceptables pour le public**

  Les freins au développement des énergies renouvelables sont multiples : des freins économiques, en relation avec les coûts d'investissements, la viabilité économique des opérations en coût global, le portage financier…, des freins techniques liés aux habitudes de l'acte de construire ou d'aménager ou encore des freins sociétaux liés à l'acceptation publique des projets.

  L'enjeu au niveau du déploiement du mix énergétique du projet CHÂTILLON est bel et bien de lever l'ensemble de ces verrous, un à un, pour déployer de façon maîtrisée le mix énergétique le plus faisable, viable et acceptable.

- **La garantie d'une continuité de service**

  Dans le cadre de la présente étude, chaque solution alternative intègre au besoin un système de secours en cas de panne des équipements ou de problèmes techniques sur le réseau afin de pouvoir assurer une continuité de service aux usagers. Les systèmes de secours représentent un investissement non négligeable mais nécessaire au bon fonctionnement des futures installations.

IV. Scénarii d'approvisionnement étudiés

Sur la base des énergies renouvelables disponibles sur le site, et en se basant sur la démarche En'R Choix, des scénarii d'approvisionnement énergétique ont été envisagés. Ils intègrent à la fois des systèmes de production individuels et la réalisation de réseaux thermiques à l'échelle du site. Ces scénarii sont déclinés ci-après avec une considération d'un scénario dît « de référence », basé sur une installation individuelle « pied d'immeuble ».

La production d'électricité photovoltaïque est traitée en parallèle des différents scénarii (voir IV. 3). Son agrégation aux scénarii sera étudiée en tant que brique indépendante dans la mesure où elle peut s'appliquer nonobstant le choix du scénario répondant aux besoins en chaleur et froid. Le potentiel d'autoconsommation d'électricité en fonction des besoins du site est aussi évalué.

Les différents scénarii sont synthétisés ci-dessous :

	N°	***Logements***	***Commerces/Logistique/Bureaux***
Scénario n°1 - Référence - Aérothermie par bâtiment	***1***	**Chaud / ECS :** Aérothermie par bâtiment	**Chaud / Froid :** Aérothermie par bâtiment
Scénario n°2 - Aérothermie par bâtiment et récupération de chaleur fatale sur les eaux grises des logements	***2***	**Chaud / ECS :** Système de récupération de chaleur sur les eaux grises avec PAC eau/eau et réhausse gaz	**Chaud /Froid :** Aérothermie par bâtiment
Scénario n°3 - Chaufferie biomasse et aérothermie	***3***	**Chaud / ECS :** Chaufferie biomasse avec appoint gaz, sous-stations collectives	**Chaud :** Chaufferie biomasse avec appoint gaz, sous-stations collectives **Froid :** Aérothermie par bâtiment

Figure 16 : Détail des scénarii

v. Description détaillée des scénarii

1. Méthodologie

Après avoir défini les différents scénarii d'approvisionnement en énergies renouvelables, chaque scénario a fait l'objet d'une analyse afin d'établir les équipements techniques associés à la production en chaud, froid et en ECS des différents bâtiments du projet.

Pour chacun des scénarii, les systèmes techniques proposés ont été pré-dimensionnés afin de répondre aux besoins en puissance du site.

Pour les scénarii mettant en œuvre des réseaux, les équipements et travaux propres à la mise en place du réseau et des infrastructures requises pour le forage et le pompage, ont également été inventoriés.

2. Description technique des scénarii

Les équipements techniques de production de chaud, froid et ECS affectés à chaque scénario sont présentés sur les pages suivantes, scénario par scénario.

SCENARIO N°1

SCENARIO DE REFERENCE

Aérothermie par bâtiment (Chaud + ECS - Froid)

DESCRIPTION GENERALE DU SCENARIO

LOGEMENTS	ACTIVITES
Système chaud : Chauffage + ECS par aérothermie par bâtiment (PAC air/eau – COP global de l'installation de 3) **Puissance Chaud : 1 112 kW**	**Système chaud et froid : Chauffage + Refroidissement par aérothermie par bâtiment (PAC VRV – COP global de l'installation de 3)** **Puissance Chaud : 199 kW** **Puissance Froid : 175 kW**

Ce scénario est celui de référence, c'est-à-dire le plus simple à mettre en place.

Il consiste en la mise en place de pompe(s) à chaleur air/eau par bâtiment et donc correspond à une production « individuelle » à l'échelle du site.

SCENARIO N°2

Aérothermie par bâtiment (Chaud - Froid) - Récupération de chaleur fatale sur les eaux grises des logements (Chaud + ECS)

DESCRIPTION GENERALE DU SCENARIO

LOGEMENTS	ACTIVITES
Système chaud : Chauffage + ECS par un système de récupération de chaleur fatale (type « ENERGIDO ») sur les eaux grises (COP global de l'installation de 4), avec réhausse gaz pour la production d'ECS. **Puissance Chaud : 1 112 kW**	**Système chaud et froid : Chauffage + Refroidissement par aérothermie par bâtiment (PAC VRV – COP global de l'installation de 3)** **Puissance Chaud : 199 kW** **Puissance Froid : 175 kW**

Récupération de chaleur fatale sur les eaux grises des logements :

La solution proposée consiste à installer sur le site un système de récupération (par échangeur) et de valorisation (par pompe à chaleur) des calories contenues dans les eaux grises du collecteur, afin d'alimenter en chaud une boucle d'eau tempérée (régime 45-50°C).

Comme présenté sur le schéma de principe p.16, cette installation consiste en :

- Dérivation des eaux grises du collecteur vers une station de pompage enterrée sous voirie,
- Refoulement des grises usées vers un échangeur spiralé qui sera installé dans les locaux techniques du projet,
- Retour des eaux grises refroidies / réchauffée vers le collecteur,
- Valorisation des calories grâce à une PAC Eau/eau installée dans la chaufferie,
- Réhausse du régime de température de l'eau par la chaudière gaz pour le bouclage d'ECS (65°C).

L'énergie produite par la PAC permettra de couvrir 80 % des besoins en chaleur des logements, le complément étant assuré par la chaudière gaz, permettant notamment de rehausser la température de la boucle tempérée pour le bouclage d'ECS.

Les besoins en chaud et froid du reste du site (hors logements) sont couverts par des PAC réversibles par bâtiment.

Conditions de mise en œuvre :

Ce scénario impliquant la récupération de chaleur fatale sur les eaux grises des logements nécessite que le raccordement des réseaux d'eaux usées et d'eau pluviale soit **séparatif** au niveau du collecteur du site.

FONDS CHALEUR :

La valorisation de chaleur fatale est une énergie subventionnable par les Fonds Chaleur (dispositif ADEME), sous réserve d'une quantité d'énergie thermique valorisée supérieure à 1 GWh/an (sauf accompagnement par un contrat chaleur renouvelable), pour laquelle il est possible d'être subventionné en moyenne entre 30 et 60% des coûts d'investissement. Une subvention de 30% a été intégrée à l'étude.

SCENARIO N°3

Chaufferie biomasse avec appoint gaz (Chaud + ECS) – Aérothermie (Froid)

DESCRIPTION GENERALE DU SCENARIO

LOGEMENTS	ACTIVITES COMMERCES / EQUIPEMENTS
Système chaud : Chauffage + ECS assuré par une chaufferie biomasse, avec appoint gaz. Ce réseau sera connecté à des sous-stations dans les bâtiments.	**Système chaud : Chauffage assuré par une chaufferie biomasse, avec appoint gaz. Ce réseau sera connecté à des sous-stations dans les bâtiments.** **Système froid : Aérothermie par bâtiment (PAC VRV – COP global de l'installation de 3)**
Puissance Chaud : 1 112 kW	**Puissance Chaud : 199 kW** **Puissance Froid : 175 kW**

Chaufferie biomasse :

Cette solution consiste en la mise en place d'une chaufferie biomasse commune avec un appoint gaz, raccordée aux différentes copropriétés via des sous-stations dans les bâtiments (1 sous-station par bâtiment). Les besoins en froid sont couverts par des pompes à chaleur Air/Eau par bâtiment.

En l'espèce, l'opération immobilière contient 6 bâtiments. Dans l'hypothèse d'une telle solution, il faudrait donc prévoir 1 chaufferie biomasse centrale commune à l'ensemble immobilier (28 000 m² et environ 437 unités d'habitation), et 1 sous-station pour chacun des 6 bâtiments.

La gestion de la chaufferie commune pourrait alors être opérée par l'Association Syndicale Libre (ASL), et chacune des sous-stations serait gérée par la copropriété afférente.

Conditions de mise en œuvre :

En dehors de l'aspect énergétique de cette solution, il conviendra également de s'assurer qu'une surface pourra être dédiée à l'installation de cette chaufferie et du silo de stockage du bois, tous deux devant être accessibles pour les livraisons, sur la base d'une logistique d'approvisionnement fluide.

A noter que l'emprise au sol va dépendre du dimensionnement de l'installation (chaudière biomasse et gaz + stockage), qui est à réaliser dans le cadre d'une étude de faisabilité. Toutefois à ce stade et selon nos retours d'expérience, **il faudrait compter environ :**

- **150 m² pour la chaufferie biomasse ;**
- **80 m² pour la chaufferie gaz ;**
- **120 m² pour le silo de stockage et l'aire de dépotage devant être accessible depuis l'espace public pour les livraisons ;**
- **150 m² pour les 6 sous-stations** (soit 25 m² / sous-station)

Soit environ **500 m²**.

FONDS CHALEUR :

La biomasse est une énergie subventionnable par les Fonds Chaleur (dispositif ADEME), sous réserve d'une production prévisionnelle de chaleur issue de biomasse supérieure à 1200 MWh/an (sauf accompagnement par un contrat chaleur renouvelable), pour laquelle il est possible d'être subventionné en moyenne entre 30 et 60% des coûts d'investissement. Une subvention de 30% a été intégrée à l'étude.

5. Production d'électricité par mise en place d'installations photovoltaïques

La production d'électricité photovoltaïque est étudiée en parallèle des scénarii présentés précédemment. Elle est considérée comme une « brique indépendante », pouvant être ajoutée aux différents scénarii.

					Puissance Module (Wc)	Surface Module (m²)	Rendement PV	
					400	1,7	0,2	
						Modules PV 400 Wc		
Estim. Production (sur la base de 1 050 m² de toiture disponible)	Type d'exposition	Surfaces (m²)	Taux util. [%]	Nbre de modules	Réduction d'irradiation (ombrage)	irradiation [kWh/m²/an]	P.inst. [Wc]	Production annuelle estimée [kWh]
	Très favorable	998	60,0%	352	-5%	1150	140 848	130 795
	Favorable	945	60,0%	334	-10%	1150	133 435	117 390

Figure 17 : Hypothèses techniques pour le dimensionnement photovoltaïque

A noter que ces surfaces de panneaux photovoltaïques installées viennent en sus des éventuelles installations PV qui seront considérées dans le cadre des études réglementaires RE2020 de la construction des bâtiments.

Détail des hypothèses et sources des données :

Le dimensionnement photovoltaïque se base sur la variante « Favorable ». Les surfaces prises en compte dans l'étude représentent 60% des surfaces de toitures totales, avec un léger ombrage (10% d'ombrage – 90% d'exposition solaire).

Le taux d'utilisation de 60% de la surface de toiture prend en compte l'encombrement des installations techniques et du passage pour l'entretien et la maintenance de toutes les installations.

Les dimensions et le rendement des panneaux sont issus de fiches techniques de Matériel standard du marché en 2023.

L'irradiation solaire à Châtillon provient du site Global Solar Atlas et les données d'autoconsommation avec surplus sont issues du site Photovoltaïque.info.

Le pourcentage d'autoconsommation est fixé à 70% et la revente à 30%, ratios issus de nos retours d'expériences sur des bâtiments de logements.

Hypothèses complémentaires considérées :

- Augmentation annuelle du prix de l'électricité à partir de 2024 selon ENERPLAN et l'ADEME : 2,5%
- Prix moyen de l'électricité : 0.194 € HT/kWh. Ce montant est basé sur une valeur moyenne du kWh début 2024 à 0,18 €HT/kWh, projeté à 2027 avec l'augmentation annuelle de 2,5%.
- Frais de Gros-Entretien-Renouvellement : remplacement des onduleurs 1 fois en 20 ans
- Réduction annuelle de la production des panneaux : - 0,25%/an
- Coûts présentés en € constants dans le temps, hors actualisation
- Aucun frais d'investissement considérés (frais liés aux emprunts)

Données et hypothèses modifiables			
Prime à l'investissement pour une installation <100kWc		***0,10***	€/Wc
Prix de revente du surplus		***0,08***	€/kWh
Hypothèse coût de l'installation		***1,20***	€HT/Wc
Consommations électriques annuelles du site	*Scénario 1*	1 159 000	kWhef
	Scénario 2	1 159 000	kWhef
	Scénario 3	782 000	
Pourcentage d'autoconsommation		***70%***	

Figure 18 : Hypothèses économiques pour le dimensionnement photovoltaïque

Les consommations électriques du site sont variables en fonction des scénarii ; elles ont un socle commun qui est le ratio de consommations mais dépendent également des équipements mis en place pour combler les besoins en chaud, ECS et en froid.

VI. Analyse comparative des scénarii

1. Méthodologie et hypothèses

L'évaluation et la comparaison globale des scénarii suivant une approche économique, énergétique et environnementale repose sur une **évaluation lot par lot découlant des affectations d'équipements** propres à chaque scénario. Ainsi, comme expliqué précédemment, des équipements techniques de production de chaud, refroidissement, rafraichissement et d'ECS ont été définis pour chaque scénario, à partir des puissances dimensionnantes. Ensuite, sur la base de ratios tarifaires, les estimations de coûts d'investissements, de maintenance et d'entretien courants et de renouvellement ont été établis. En parallèle, une approche énergétique a été est menée permettant d'estimer notamment les consommations énergétiques de chaque scénario, sur base des rendements et COP de chaque système. Enfin, un calcul de l'impact carbone propre aux scénarii a été réalisé.

QUELQUES DEFINITIONS

Energie utile : Energie disponible au niveau de l'utilisateur final qui correspond au besoin thermique

Energie finale : Energie fournie aux équipements de production destinés à produire les usages attendus

Energie primaire : L'énergie primaire mesure le prélèvement à la source (c'est à dire la nature), que l'on effectue pour produire de l'énergie finale (celle que l'on utilise).

Pour l'électricité en particulier, on considère qu'il faut 2,3 kWh d'énergie primaire pour produire 1 kWh d'énergie électrique utilisable par le consommateur. Pour les énergies fossiles, on considère que l'énergie utilisable est égale à l'énergie primaire.

COP : COefficient de Performance représente la performance énergétique de la pompe à chaleur. Il correspond au rapport entre l'énergie utile (chaleur restituée pour le chauffage) et l'énergie consommée (facturée) pour faire fonctionner la pompe à chaleur

Pour l'analyse comparative des scénarii étudiés, des critères énergétiques, économiques et environnementaux sont proposés. Ces différents critères et leurs hypothèses sont détaillés ci-après.

a) Critères énergétiques

Les critères environnementaux calculés sur la base de l'estimation des besoins en énergie finale pour chaque lot sont :

- ***Consommation en énergie utile ;***
- ***Consommation en énergie primaire ;***
- ***Taux de couverture des besoins en énergie utile des opérations par les productions en énergies renouvelables*** *ou taux d'approvisionnement en énergies renouvelables*

  NB : Ce dernier est différent du taux en énergie renouvelable des réseaux qui correspond à la part d'énergie renouvelable sur l'ensemble des consommations d'énergie de du site (et non des besoins).

b) Critères économiques

Les critères économiques reposent sur l'**approche en coût global** incluant les phases d'investissement et de fonctionnement des systèmes mis en place. Cette approche permet de projeter chaque opération sur plusieurs dizaines d'années afin d'en évaluer les paramètres de rentabilité, en intégrant les coûts liés à l'énergie, à l'exploitation/maintenance et au gros entretien-renouvellement.

Cette analyse a nécessité l'évaluation des postes de coûts propres à l'investissement, l'exploitation et la maintenance des systèmes mis en place pour les différents lots, et plus précisément les postes suivants :

P1 : Les coûts d'investissements : Les coûts d'investissement de chaque ensemble d'équipements de production considérés dans les scénarii sont basés sur des ratios actualisés issus de la bibliographie et de retours d'expériences de notre bureau d'études.

A noter que le coût d'investissement de l'installation photovoltaïque est lui issu de l'étude de pré-dimensionnement propre au site réalisée dans le cadre de cette étude, présentée plus loin en partie VI. 4.

P2 : Coûts annuels : constitués des coûts de maintenance et d'entretien courants annuels, et des coûts annuels de renouvellement et de gros entretiens des équipements *(lissés sur une année)*. Ces coûts ont été évalués selon des ratios connus issus de retours d'expériences.

Cet indicateur intègre aussi les coûts annuels des consommations énergétiques.

Hypothèses coûts de l'énergie :

- Il a été considéré que le tarif de l'électricité réseau subi une augmentation de 2,5% par an à partir de 2025 (hypothèse basse de ADEME/ENERPLAN rejointe par la Commission de Régulation de l'Energie, la Cour des Comptes et l'UFE) (même hypothèse que pour le prix de revente de l'électricité issue d'installation photovoltaïque).
- Coût moyen du kWh de pellets : 0.074 €/kWh.
  Une augmentation moyenne de 2% a été prise en compte**.

De même, une hypothèse d'augmentation annuelle de 2% des coûts de maintenance a été prise.

** Source : étude ADEME « Coût des énergies renouvelables en France » mise à jour en janvier 2020.*

*** Source : étude ADEME « Enquête sur les prix des combustibles bois en 2022-2023 » de juin 2023.*

P3 : Coût global sur 25 ans : Méthode de calcul basée sur la norme ISO/DIS 15686-5. Ce coût n'intègre pas de taux d'emprunt des investissements ni de taux d'évolution des tarifs du réseau de chaleur. Un taux d'évolution de +2,5% par an sur les tarifs de l'électricité a cependant été pris en compte.

c) Critère environnemental

Les bâtiments sont à l'origine d'environ la moitié des émissions primaires de particules fines (PM 2,5) dans l'Union Européenne, responsables de décès et de maladies.

L'Union Européenne porte une ambition climatique et énergétique renforcée dans le cadre de la directive (UE) 2016/2284 pour l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments : les bâtiments neufs devraient être à émissions nulles d'ici à 2030, et les bâtiments existants devraient être transformés en bâtiments à émissions nulles d'ici à 2050.

Dans ce contexte, l'impact carbone des activités et des consommations de chaque utilisateur de bâtiment, est évidemment un critère majeur d'analyse. Dans ce contexte, ***l'impact carbone*** des activités et des consommations de chaque utilisateur de bâtiment, est évidemment un critère majeur d'analyse.

Le tableau ci-dessous est un indicateur des empreintes carbones (ratios d'émissions carbone estimatives en équivalent CO_2) de chaque type de production de chaleur/d'énergie pouvant potentiellement être mis en place sur le projet CHÂTILLON. Les estimations de l'impact carbone des scénarii seront basées sur ces données.

CARBONE	***Impact carbone électricité réseau***		79 geqCO2/kWh
	Impact carbone chaufferie Gaz		75 geqCO2/kWh
	Impact carbone PV	module fabriqué en Asie	44 geqCO2/kWh
		module européen	32 geqCO2/kWh
		module français	25 geqCO2/kWh
	Impact carbone PAC Air/Eau		49 geqCO2/kWh
	Impact carbone chauffage bois		26 geqCO2/kWh

Figure 19 : Impact carbone en fonction de l'équipement/type de production d'énergie - données issus de la Base Empreinte de l'ADEME

2. Résultats / Comparaison Critères énergétiques

Les différents scénarii ont donc été comparés par rapport à leur consommation d'énergie finale et primaire, énergie achetée, énergie autoconsommée et taux d'approvisionnement en énergies renouvelables.

Les résultats obtenus après analyse de l'étude réalisées selon les critères énergétiques sont présentés dans le tableau ci-dessous et dans les graphes qui suivent. Pour rappel, le scénario PV a été traité séparément.

	CONSOMMATIONS D'ENERGIE				MOBILISATION DES ENERGIES RENOUVELABLES	
	Besoin Energie utile MWh/an	**Consommation Energie finale MWh_{ef}/an**	**Gain énergétique récupération chaleur EU MWh_{ef}/an**	**Consommation Energie primaire MWh_{ep}/an**	**% EnR**	**Energie renouvelable Consommée MWh/an**
Scénario n°1 - Référence - Aérothermie par bâtiment	2 237 MWh	1 698 MWh	0 MWh	3 905 MWh	48%	1 077 MWh
Scénario n°2 - Aérothermie par bâtiment et récupération de chaleur fatale sur les eaux grises des logements		1 834 MWh	266 MWh	3 810 MWh	45%	988 MWh
Scénario n°3 - Réseau de chaleur sur chaufferie biomasse et aérothermie		1 095 MWh	0 MWh	2 205 MWh	59%	1 302 MWh

Figure 20 : Comparaison des résultats obtenus au niveau des indicateurs environnementaux pour les différents scénarii étudiés

Le détail de ces consommations est présenté ci-dessous :

Consommation		Vecteur énergétique	Besoin énergie utile	Conso annuelle energie finale	Conso annuelle energie primaire	% EnR	EnR autoconsommée	Appro ENR
Scénario n°1 - Référence - Aérothermie par bâtiment	Chaud + ECS	Electricité	1 399 MWh	466 MWh	3 905 MWh	67%	1 077 MWh	48%
	Froid		217 MWh	72 MWh				
	Aux		621 MWh	1 159 MWh		0%	0 MWh	
Scénario n°2 - Aérothermie par bâtiment et récupération de chaleur fatale sur les eaux grises des logements	Chaud + ECS logements	Effluents (80%)	1 332 MWh	266 MWh	613 MWh	61%	988 MWh	45%
		Gaz (appoint)		313 MWh	313 MWh			
	Chaud hors logements	Electricité	67 MWh	22 MWh	51 MWh			
	Froid		217 MWh	72 MWh	166 MWh			
	Aux		621 MWh	1 159 MWh	2 667 MWh	0%	0 MWh	
Scénario n°3 - Réseau de chaleur sur chaufferie biomasse et aérothermie	Chaud + ECS	Gaz (appoint)	1 399 MWh	241 MWh	241 MWh	81%	1 302 MWh	59%
	Froid	Electricité	217 MWh	72 MWh	166 MWh			
	Aux		621 MWh	782 MWh	1 798 MWh	0%	0 MWh	

Figure 21 : Détails des consommations d'énergie

a) Consommations en énergie finale

La figure ci-dessous détaille la répartition des consommations énergétiques finales des différents scénarii :

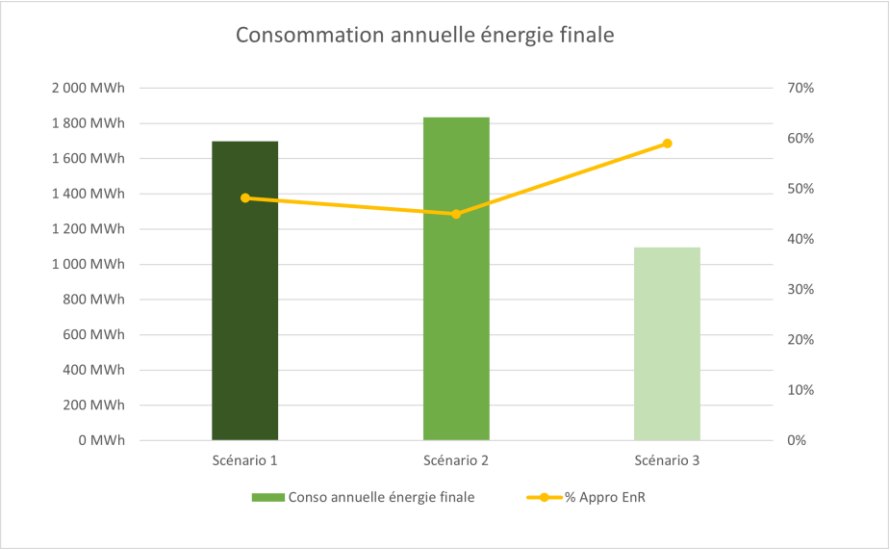


Figure 22 : Comparaison des consommations énergétiques finales annuelles

Bien que le système de récupération de chaleur sur les eaux usées mobilise une PAC Eau/Eau au coefficient de performance plus élevé qu'une PAC Air/Eau, comme mise en place dans le scénario 1, on constate que le gain sur les consommations énergétiques est finalement contrebalancé par les consommations de la chaudière gaz faisant office de réhausse, faisant finalement apparaître le scénario 2 comme celui à la consommation en énergie finale la plus importante.

En parallèle, on remarque que la **consommation en énergie finale** du **Scénario n°3**, basé sur un chauffage bois est la plus faible.

b) Consommations en énergie primaire

La comparaison des consommations en énergie primaire des différents scénarii est présentée dans le graphique ci-après :

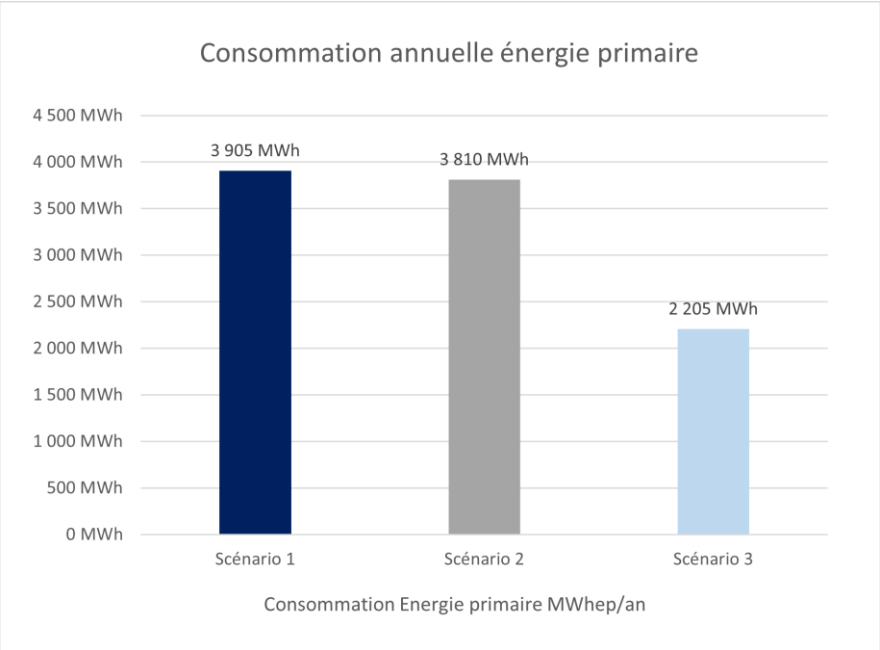


Figure 23 : Comparaison des consommations annuelles en énergie primaire

De même que précédemment, le Scénario n°3 présente la **consommation en énergie primaire** la plus faible.

c) Energie achetée

Si l'on se focalise sur **l'énergie achetée** suivant les scénarii, les résultats obtenus sont les suivants :

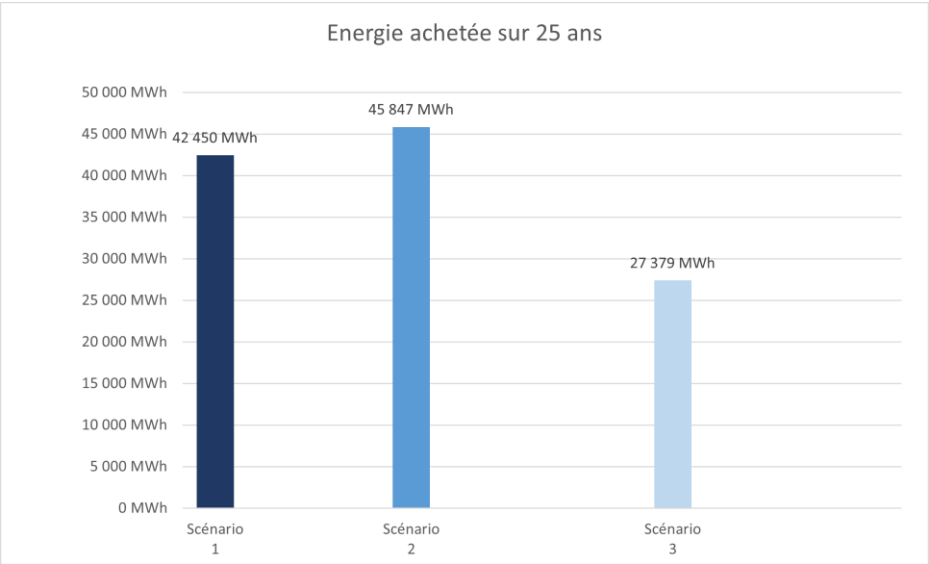


Figure 24 : Comparaison de l'énergie achetée sur 25 ans

Il apparait que l'énergie achetée sur 25 dans le cas du scénario n°3 est la plus faible.

a) Taux d'approvisionnement en énergies renouvelables

Enfin, à l'issue de notre étude, nous obtenons les **taux d'approvisionnement en énergies renouvelables** du site suivants (hors solaire photovoltaïque) :

Scénario 1 : 48%

Scénario 2 : 45%

Scénario 3 : 59%

Les scénarii n°1 et 2 présentent un taux d'approvisionnement en énergie renouvelables du même ordre de grandeur, avec un taux légèrement plus faible pour le scénario 2, étant impacté par les consommations de la réhausse gaz. Le Scénario 3 quant à lui présente un taux environ d'approvisionnement en énergie renouvelables 20% plus élevé que les deux autres scénarii.

Après comparaison des différents scénarii suivant les critères énergétiques fixés dans cette étude, il apparait que le scénario n°3 basé sur une chaufferie biomasse serait le plus avantageux en termes de consommations énergétiques (primaire, finale, énergie achetée).

Si l'on s'attache au taux d'approvisionnement en énergie renouvelables**, l'ordre de grandeur de ces taux est sensiblement le même pour les trois scénarii. A ce stade, le niveau de précision ne nous permet pas de statuer sur une différence majeure mais plutôt refléter des tendances.** Nous verrons par la suite comment, avec l'ajout de productions photovoltaïques, ce taux d'approvisionnement en EnR peut être bonifié.

3. Résultats / Comparaison Critères économiques

L'étude des consommations d'énergies est importante pour savoir si un scénario est plus avantageux qu'un autre, mais l'aspect financier est un facteur de décision tout aussi primordial.

Sur la base des éléments de stratégie d'approvisionnement, les différents coûts des scénarii (investissements, maintenance, consommation d'énergie, remplacement de certains éléments …) ont été estimés pour proposer un ordre de grandeur des coûts engendrés. Ils sont présentés en synthèse dans les tableaux et graphes suivants. Le scénario PV a été traité séparément car il peut être combiné à tous les scénarii.

Voici une première estimation des investissements, coûts annuels et coûts globaux pour les différents scénarii étudiés :

Synthèse économique	***Coût investissement (P1) (subventions incluses)***	***Coût Annuel (P2)***	***Coût global sur 25 ans (P3)***	***TRI***
Scénario n°1 - Référence - Aérothermie par bâtiment	1 500 k€	475 k€	17 600 k€	-
Scénario n°2 - Aérothermie par bâtiment et récupération de chaleur fatale sur les eaux grises des logements	1 900 k€	459 k€	16 900 k€	14 ans
Scénario n°3 - Réseau de chaleur sur chaufferie biomasse et aérothermie	1 300 k€*	317 k€	11 400 k€	1ère année

Figure 25 : Comparaison des résultats obtenus au niveau des indicateurs économiques pour les différents scénarii étudiés

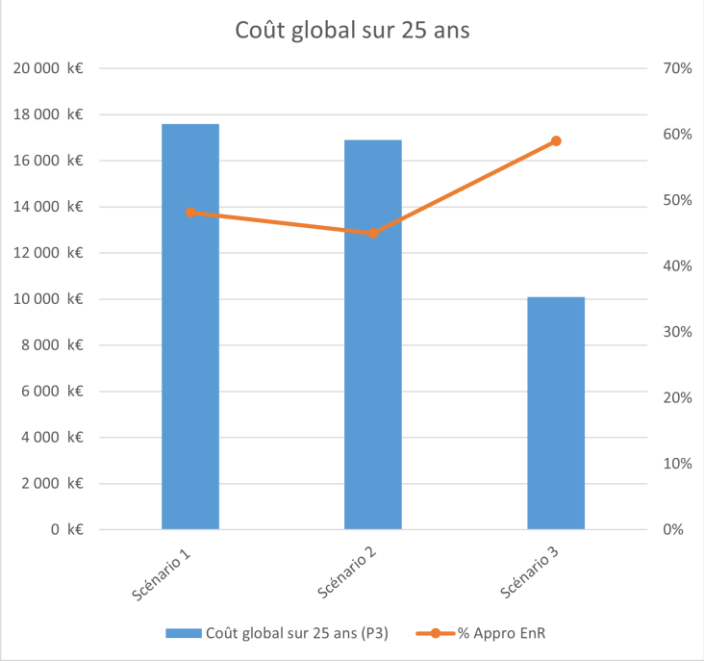


Figure 26 : Comparaison des coûts globaux sur 25 ans des différents scénarii

Le scénario n°3 présente le coût global le moins élevé. Ceci est lié d'une part au coût d'investissement plus faible que pour la mise en place de PAC par bâtiment, et d'autre part au coût annuel de l'énergie maitrisé comparé à une solution approvisionnée à 100% sur le réseau électrique, au tarif basé sur une augmentation de 2,5% par an.

** Il est précisé que la solution de chauffage biomasse requiert une surface de locaux en rez-de-chaussée accessibles sur rue de l'ordre de 120 m². Cette surface se substituerait à d'éventuels commerces en pied d'immeuble avec la nécessité d'une aire de livraison dédiée sur rue, un cheminement dédié et/ou une trappe permettant de livrer le bois, et impacte donc l'équilibre financier de l'opération (chiffre d'affaires) d'après la MOA, ce qui ne ressort pas dans les coûts d'investissement de la présente étude.*

Au regard de ces estimations, le scénario qui présenterait le coût global le plus faible est le scenario 3.

4. Résultats / Intégration du solaire photovoltaïque

Selon les hypothèses présentées dans la partie 5. de la présente étude, le coût de l'opération a été estimé à **200 k€ HT**.

En fonction des scénarii, la consommation d'électricité ne sera pas la même selon les différents équipements mis en place pour la production de chaud et de froid.

Voici un tableau récapitulatif des gains projetés sur 25 ans, ainsi que du taux de couverture des besoins électriques du site avec l'installation de panneaux photovoltaïques :

	% autoconsommation	*Gain financier sur 25 ans*	*Taux de couverture des besoins électriques du site*
Scénario 1	70%	**404 k€**	**7%**
Scénario 2			**7%**
Scénario 3			**10%**

Figure 27 : Gain financier et taux de couverture des besoins électriques avec PV

Le coût d'investissement total des scénarii incluant le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est détaillé ci-dessous, en parallèle de la bonification de l'approvisionnement en énergies renouvelables du site :

	Investissement sans PV	*Investissement avec PV*	*% Appro EnR sans PV*	*% Appro EnR avec PV*
Scénario 1	1 500 k€	**1 700 k€**	48%	**52%**
Scénario 2	1 900 k€	**2 100 k€**	45%	**48%**
Scénario 3	1 300 k€	**1 500 k€**	59%	**65%**

Figure 28 : Investissement total et % approvisionnement en EnR avec PV

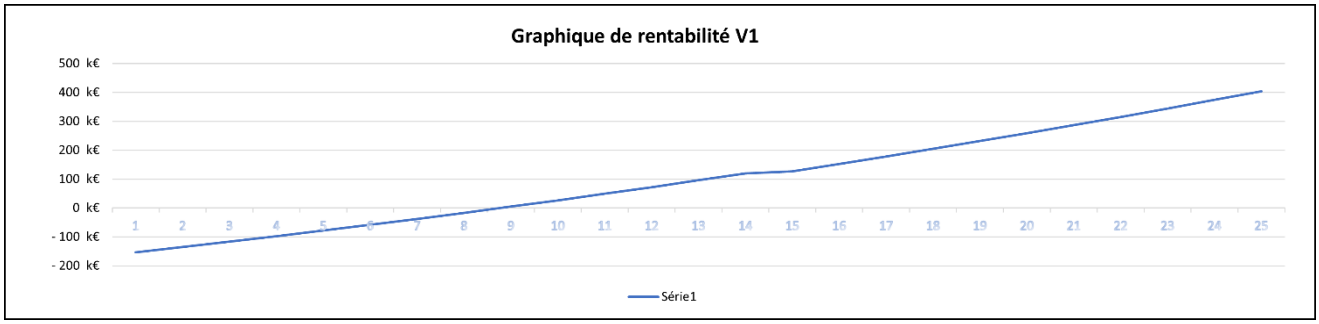


Figure 29 : Rentabilité de l'installation PV

La mise en place des productions solaires photovoltaïques est un investissement couteux mais extrêmement favorable sur le moyen/long terme. Dans le cas du projet CHÂTILLON, il faudra environ **9 ans** pour avoir un retour sur investissement positif.

Par ailleurs, cet apport énergétique est un véritable avantage dans l'économie électrique au vu de la capacité d'autoconsommation du site. Cela permettrait l'intégration d'une composante de **stabilité importante dans le coût d'approvisionnement** en électricité, et une **amélioration de l'approvisionnement en énergies renouvelables** du site.

5. Résultats / Critère environnemental d'impact Carbone

Voici une première approche quant à l'impact Carbone lié à la consommation énergétique de chaque scénario, suivant que l'on considère une installation photovoltaïque ou non :

Synthèse Carbone	***Impact carbone annuel - Sans PV***	***Impact carbone annuel - Avec PV***
Scénario n°1 - Référence - Aérothermie par bâtiment	118 teqCO2	114 teqCO2
Scénario n°2 - Aérothermie par bâtiment et récupération de chaleur fatale sur les eaux grises des logements	133 teqCO2	129 teqCO2
Scénario n°3 - Réseau de chaleur sur chaufferie biomasse et aérothermie	72 teqCO2	68 teqCO2

Figure 30 : Comparaison des impacts carbone des différents scénarii étudiés avec et sans PV

Si l'on considère les scénarii seuls, sans intégration de panneaux photovoltaïques :

Dans chacun des scénarii, une partie des besoins est apportée par le réseau électrique, à l'impact carbone relativement élevé (cf. Figure 19).

Le scénario n°2 est impacté de son côté par une part d'approvisionnement en gaz.

Le scénario 3 présente l'impact carbone le plus faible et représente donc une production d'énergie intéressante sur cet aspect.

Si l'on considère l'intégration de panneaux photovoltaïques :

De manière générale, l'intégration de panneaux solaires photovoltaïques avec autoconsommation permet de **réduire l'impact carbone** de l'énergie électrique consommée par rapport à celle du réseau.

Le scénario n°3 apparait donc comme le système le moins producteur de carbone, dont l'impact carbone est minimisé avec l'ajout d'une installation photovoltaïque.

A noter qu'en termes d'impact sanitaire, le recours à la Biomasse est également à mesurer à la lumière des impacts sur la qualité de l'air de cette énergie (émission de particules fines notamment).

6. Synthèse des résultats

Les résultats de l'approche multicritère présentés précédemment sont résumés dans le tableau ci-dessous. Ils intègrent l'approche avec ou sans panneaux photovoltaïques.

	Synthèse énergétique						Synthèse économique				Synthèse Carbone	
	Consommation Energie primaire MWhep/an	Consommation Energie finale MWhef/an	Achat Energie finale MWhef/an - Sans PV	Achat Energie finale MWhef/an - Avec PV	% utilisation EnR - Sans PV	% utilisation EnR - Avec PV	Coût Investissement - Sans PV	Coût Investissement - Avec PV	Coût global sur 25 ans - Sans PV	Coût global sur 25 ans - Avec PV	Impact carbone annuel - Sans PV	Impact carbone annuel - Avec PV
Scénario n°1 - Référence - Aérothermie par bâtiment	**3 905 MWh**	**1 698 MWh**	1 698 MWh	**1 079 MWh**	48%	**52%**	1 500 k€	**1 700 k€**	17 600 k€	**23 100 k€**	118 teqCO2	**114 teqCO2**
Scénario n°2 - Aérothermie par bâtiment et récupération de chaleur fatale sur les eaux grises des logements	**3 810 MWh**	**1 834 MWh**	1 834 MWh	**1 393 MWh**	45%	**48%**	1 900 k€	**2 100 k€**	16 900 k€	**22 400 k€**	133 teqCO2	**129 teqCO2**
Scénario n°3 - Réseau de chaleur sur chaufferie biomasse et aérothermie	**2 205 MWh**	**1 095 MWh**	1 095 MWh	**943 MWh**	59%	**65%**	1 300 k€	**1 500 k€**	10 100 k€	**14 900 k€**	72 teqCO2	**68 teqCO2**

Figure 31 : Synthèse de l'analyse multicritère - avec et sans PV

VII. Conclusion

En cohérence avec le Code de l'Environnement, l'enjeu de la présente étude était d'identifier les solutions techniques d'approvisionnement énergétique, intégrant une part significative d'énergies renouvelables et viables économiquement pour les opérateurs, pour les futures opérations du projet CHÂTILLON et d'en étudier leur impact environnemental sous plusieurs critères, constituant ainsi une aide à la décision pour le Maître d'Ouvrage.

Dans cette optique, après une analyse de l'état initial des énergies renouvelables disponibles et mobilisables sur site, une série de scénarii d'approvisionnements énergétiques alternatifs jugés les plus faisables et adaptés ont été identifiés. Ces scénarii prévoient l'exploitation potentielle de plusieurs types d'énergies renouvelables : le solaire photovoltaïque, la récupération de chaleur fatale sur les eaux usées des logements, la biomasse et l'aérothermie. Nous avons notamment étudié la possibilité de combiner la production d'électricité renouvelable liée à une installation solaire photovoltaïque à l'aérothermie.

L'enjeu était de comparer, le plus objectivement et indépendamment possible, les différents scénarii d'approvisionnement alternatifs envisageables pour l'opération. Ainsi, les scénarii ont été comparés selon une analyse multicritère suivant des critères économiques, énergétiques et environnementaux.

Si l'on considère le système de chaufferie par biomasse (scénario 3), il apparait comme une solution pertinente au regard des critères étudiés. Toutefois, ce système nécessite une surface importante dédiée à l'installation de la chaufferie et du silo de stockage du bois, devant être accessible depuis la rue pour les livraisons de matière première. Les résultats de l'étude sont aussi à contrebalancer vis à vis des impacts, notamment logistiques, liés à l'approvisionnement en combustible bois, et sanitaires (émission de particules fines notamment).
Il convient également de mettre la solution biomasse en perspective avec l'exploitation future du projet. En effet, le projet imbrique 6 bâtiments aux usages différents (logement, hébergement, activités, etc.), dans lesquels sont prévues plusieurs copropriétés indépendantes avec une multitude de propriétaires : les paramètres liés à la gestion administrative de tels équipements communs devront être pris en compte.

Les besoins énergétiques globaux du projet sont estimés à terme à environ 2 237 MWh/an (chaud, froid, électricité), décomposés de la manière suivante : 1 399 MWh/an de chaleur, 217 MWh/an de froid et 621 MWh/an pour les autres usages. Le potentiel d'approvisionnement en énergies renouvelables du site permet d'envisager un taux de couverture important pour chacun des usages. Ainsi, en fonction des différentes stratégies d'approvisionnement et des différents niveaux de besoins énergétiques, il est possible d'atteindre entre 45 et 65 % de couverture par les énergies renouvelables.

Par ailleurs, **l'intégration d'installations de production solaire photovoltaïque** à l'échelle du site représente une production d'énergie renouvelable locale particulièrement intéressante pour la production locale d'électricité indépendamment des solutions centralisées traditionnelles. En effet, en intégrant de la production solaire photovoltaïque et donc une part d'autoconsommation aux scénarii, les indicateurs énergétiques et environnementaux sont plus performants. Cela permet également l'intégration d'une composante de stabilité importante dans le coût d'approvisionnement en électricité.

A l'issue de l'analyse menée, telle que présentée ci-avant, plusieurs solutions de recours aux énergies renouvelables sont mobilisables dans le cadre de l'aménagement projet Châtillon, à ce stade du projet.

L'un des scénarios apparaissant comme le plus avantageux sur les plans économique et énergétique est le **scénario n°3, basé sur le déploiement d'une chaufferie bois.** Toutefois, en prenant en compte les différentes conditions de mise œuvre évoquées, celui-ci présente des contraintes importantes rendant le scénario non envisageable aux dires de la Maitrise d'Ouvrage.

Le scénario n°1 basé sur l'aérothermie permet quant à lui de maitriser l'achat d'énergie et de valoriser une proportion intéressante d'énergie renouvelable en couvrant les besoins du site en chaleur (chauffage/Eau Chaude Sanitaire).

Le scénario n°2 basé sur un système de récupération de chaleur sur les eaux grises des logements présente également des avantages intéressants sur le volet économique, bénéficiant d'un temps de retour sur investissement d'une dizaine d'années.