

Etude d'approvisionnement en Energie renouvelable et de récupération

Régénération urbaine du centre commercial Auchan le Sillon – Saint-Herblain (44)

Référence : 2025.1528 E03 A

Le 02/12/2025

Rédigé par : Anaëlle GREBERT

Vérifié par : Julia MALINVERNO



SOMMAIRE

Contexte	5	Installations hydroélectriques	14
1.1 Objectif de l'étude	5	Installations de géothermie	14
1.2 Contexte réglementaire.....	7	2. Analyse des besoins énergétiques	16
1.2.1 Les ambitions nationales	7	2.1 Descriptif des besoins	16
Loi Transition écologique pour la Croissance Verte (LTECV)	7	2.2 Programmation.....	16
Loi Energie Climat (LEC)	7	2.3 Hypothèses générales	18
Loi Climat et Résilience	8	2.4 Evaluation des besoins énergétiques.....	18
Loi d'Accélération de la Production d'Energie Renouvelable (APER)	8	2.5 Projets environnants et bâtiments existants	18
RE2020	9	2.6 Construction de la stratégie énergétique	18
1.2.2 Les ambitions du territoire	10	3. Inventaire du potentiel en énergie renouvelables	20
Le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable, et d'Egalité des Territoires (SRADDET)	10	3.1 Contexte climatique du site	20
Le Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET)	11	3.2 Les réseaux de chaleur	23
Le Plan Local d'Urbanisme intercommunal de Nantes Métropole	11	3.2.1 Les réseaux de chaleur existants	23
1.3 Localisation de la zone d'étude.....	12	A l'échelle de la commune	23
1.4 Contexte énergétique territorial	12	Le Réseau Nord-Chézine	23
Unité de valorisation énergétique (UVE)	12	3.2.2 Création d'un réseau de chaleur	24
Installations biomasse.....	13	3.3 La géothermie	25
Installation photovoltaïque	13	3.3.1 Géothermie basse énergie (sur aquifère profond).....	25
Installations de l'éolien	14	3.3.2 Géothermie très basse énergie (sur nappe superficielle).....	26

Principe de fonctionnement	26	3.6.4 Des équipements collectifs à l'échelle du bâtiment ou de l'îlot	43
Caractéristiques du territoire	27	Chaudière biomasse collective	43
Opportunités sur le projet	27	Performance et impact des chaufferies collectives	43
3.3.3 Géothermie très basse énergie sur champs de sonde	27	3.7 La méthanisation et la micro-méthanisation	44
Sondes horizontales	27	3.8 L'énergie solaire	45
Sondes verticales	28	Le solaire thermique	46
3.3.4 Boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG)	30	Le solaire photovoltaïque	46
3.3.5 Contexte réglementaire	31	Le solaire hybride	48
Code minier	31	3.9 L'éolien	49
Géothermie de minime importance (GMI)	31	3.9.1 Le grand et moyen éolien	49
3.3.6 Géothermie hors minime importance	33	3.9.2 Le petit éolien : les éoliennes de bâtiment	49
3.4 Aérothermie	33	4. Bilan atouts-contraintes	51
3.5 Les énergies de récupération	34	5. Stratégie énergétique	55
3.5.1 La récupération de chaleur sur eaux grises	34	5.1 Hypothèses	55
3.5.2 La récupération d'énergie sur eaux usées urbaines	35	5.2 Variation du niveau de besoins thermiques	55
3.5.3 La récupération de chaleur sur groupe froid	37	5.3 Volet thermique	55
3.5.4 Récupération de chaleur fatale sur les datacenters	37	5.3.1 Scénario 1 - Référence	55
3.5.5 Chaufferie numérique	38	5.3.2 Scénario 1 bis – Diminution des besoins	55
3.6 Le bois énergie	39	5.3.3 Scénario 2 – Raccordement RCU	55
3.6.1 Ressource	39	5.3.4 Scénario 3 – Géothermie sur champs de sondes	56
3.6.2 Equipement collectif	39	5.3.5 Scénario 4 – Récupération de chaleur sur eaux grises	56
3.6.3 Un réseau de chaleur Bois-énergie à l'échelle quartier	42	5.4 Volet électrique	56

5.4.1	Scénario 1 -Référence	57	6.4.2	Scénario 1 bis – Diminution des besoins	60
5.4.2	Scénario 2 – 50% de toitures solarisée en ACC	57	6.4.3	Scénario 2 – Raccordement RCU	61
5.4.3	Scénario 3 – 50% de toitures solarisée en ACI	57	6.4.4	Scénario 3 – Géothermie sur champs de sondes	61
5.4.4	Scénario 4 – 100% de toitures solarisée en ACC	57	6.4.5	Scénario 4 – Récupération de chaleur sur ECS	62
5.5	Synthèse des scénarios	58	6.5	Analyse des scénarios électriques	63
5.5.1	Scénarios thermiques	58	6.5.1	Résultats bruts	63
5.5.2	Scénario électriques	58	6.5.2	Scénario 1 – Référence : pas de solarisation	64
6.	Analyse technico-économique des scénarios	59	6.5.3	Scénario 2	64
6.1	Hypothèses	59	6.5.4	Scénario 3	65
6.2	Description des indicateurs environnementaux	59	6.5.5	Scénario 4	66
6.2.1	Volet thermique	59	6.6	Analyse croisée – Taux EnR	67
6.2.2	Volet électrique	59	7.	Conclusions	68
6.3	Description des indicateurs économiques.....	59	7.1	Performances environnementales	68
6.3.1	Volet thermique	59	7.2	Performances économiques	69
6.3.2	Volet électrique	59	7.3	Faisabilité technique	69
6.4	Analyse des scénarios thermiques.....	60	7.4	Synthèse.....	70
6.4.1	Scénario 1 – Référence	60			

CONTEXTE

1.1 Objectif de l'étude

L'étude d'approvisionnement en énergies renouvelables du projet d'aménagement de régénération urbaine du centre commercial Auchan le Sillon à Saint-Herblain, vise à qualifier le potentiel en énergies renouvelables des futurs bâtiments.

L'étude vise également à guider les futurs constructeurs quant aux choix stratégiques à retenir pour l'approvisionnement énergétique des secteurs et des lots.

L'étude d'approvisionnement en énergie renouvelable répond aux exigences décrites dans l'article L128-4 du code de l'urbanisme, précisant que : « *Toute action ou opération d'aménagement telle que définie à l'article L. 300-1 et faisant l'objet d'une étude d'impact doit faire l'objet d'une étude de faisabilité sur le potentiel de développement en énergies renouvelables de la zone, en particulier sur l'opportunité de la création ou du raccordement à un réseau de chaleur ou de froid ayant recours aux énergies renouvelables et de récupération.* ».

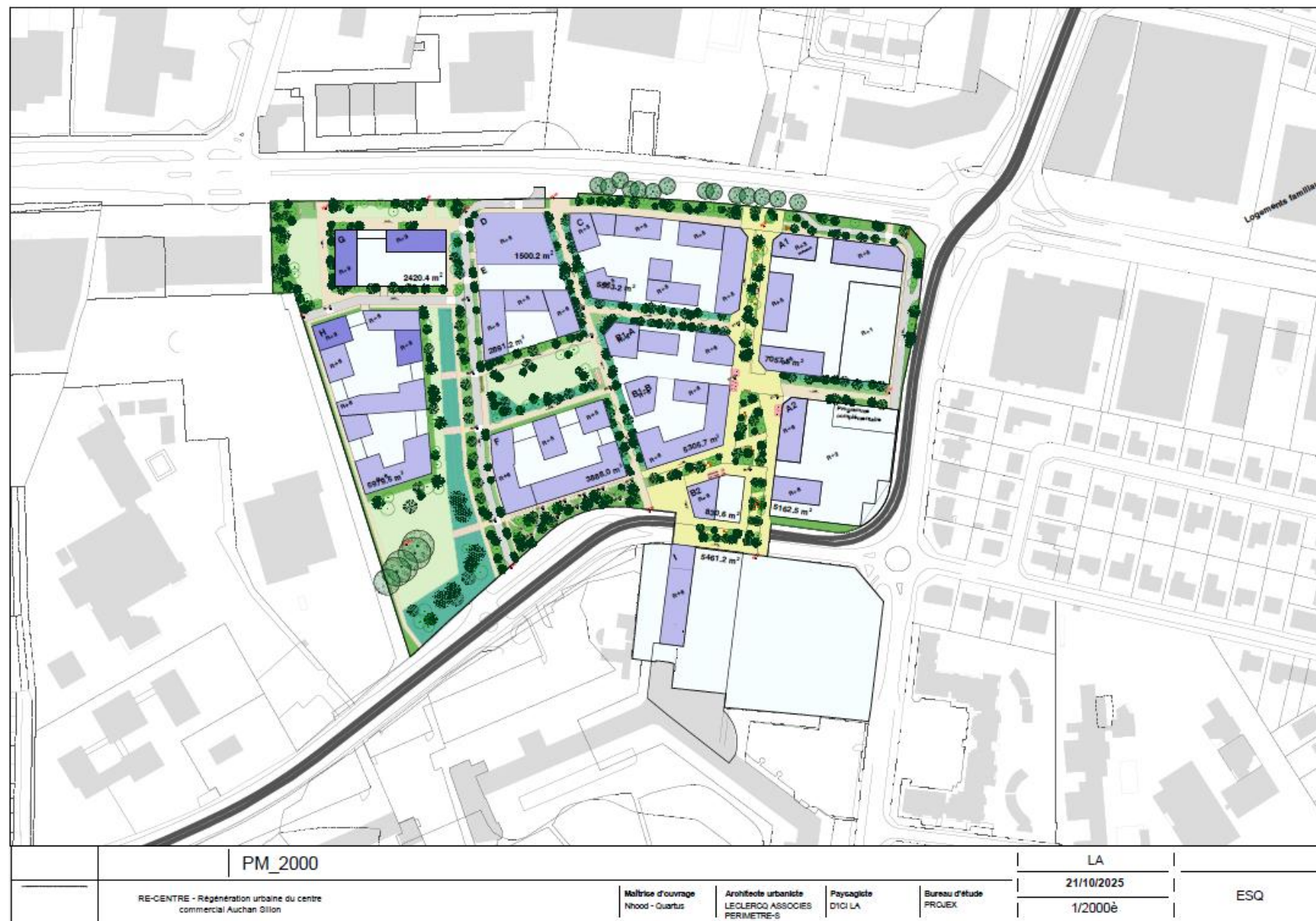


Figure 1 : Plan masse du projet

1.2 Contexte réglementaire

1.2.1 Les ambitions nationales

Loi Transition écologique pour la Croissance Verte (LTECV)

La transition énergétique est un enjeu fondamental du 21^{ème} siècle. Afin de relever ce défi, la France se doit de mener une politique exemplaire pour lutter efficacement contre le réchauffement climatique et réduire le recours aux énergies fossiles et nucléaires. La transformation du modèle énergétique permet de favoriser l'emploi, d'encourager l'innovation et d'augmenter le pouvoir d'achat grâce aux économies d'énergie. La loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte explicite les objectifs à venir pour le pays :

- Réduire de 40% les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2030 et diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre (GES) entre 1990 et 2050 ;
- Réduire de 50% la consommation énergétique finale en 2050 par rapport à la référence 2012 ;
- Porter à 32% la part des énergies renouvelables (EnR) de la consommation finale d'énergie en 2030 et à 40% dans la production d'électricité.

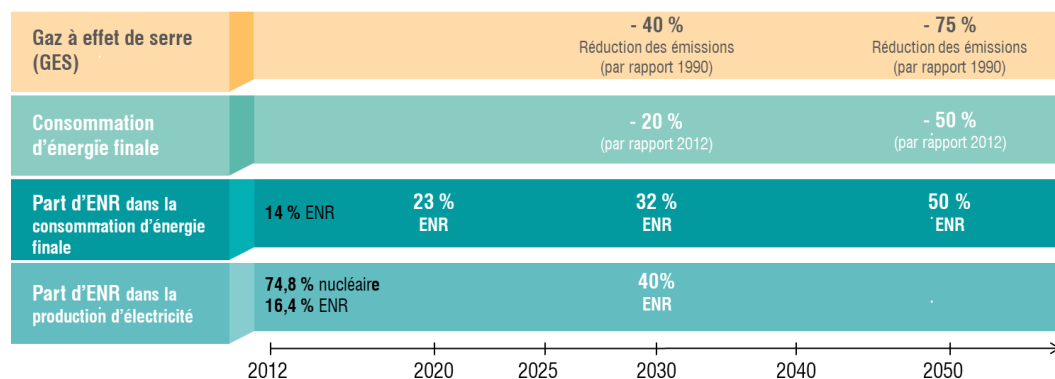


Figure 3 : Récapitulatif des objectifs de la LTECV - Vizea

Loi Energie Climat (LEC)

Une nouvelle loi venant compléter la LTECV a été adoptée en 2019 : la Loi Energie Climat (LEC). L'objectif de cette loi est d'**atteindre la neutralité carbone à l'échéance 2050**. Elle se concentre sur trois objectifs principaux à savoir :

- Décarboner le mix énergétique en accélérant la baisse de la consommation d'énergies fossiles à 40% en 2030 (au lieu de 30%) et mettre fin à la production d'électricité à partir du charbon ;
- Transformer notre modèle énergétique avec des objectifs réalistes, en portant le délai à 2035 pour la baisse de la part de nucléaire dans le mix énergétique ;
- Evaluer la mise en œuvre des engagements dans tous les secteurs en créant le Haut Conseil pour le climat, chargé notamment d'étudier les décisions prises par l'état et de recommander des actions en faveur de la lutte contre le dérèglement climatique ;
- Cette loi vient ainsi renforcer les ambitions politiques énergétiques de la France, en cohérence avec la **Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE)** et la **Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)**.

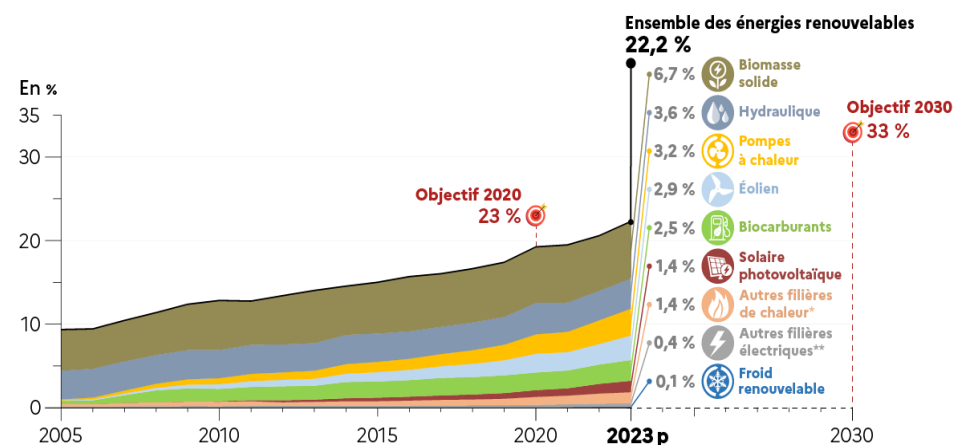


Figure 2 : Trajectoire de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie – Statistique.Développement-Durable.gouv.fr

Loi Climat et Résilience

La loi portant sur la lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, dite loi « Climat et Résilience » a été adoptée en août 2021 à la suite de la traduction d'une partie des 146 propositions de la Convention Citoyenne pour le Climat (CCC), afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40% d'ici 2030.

Cette loi s'articule autour des cinq thématiques présentées par la CCC, à savoir : consommer, produire et travailler, se déplacer, se loger, se nourrir. Elle renforce aussi la protection judiciaire de l'environnement.

Sur le volet énergétique, la loi Climat et Résilience soutient les énergies renouvelables notamment via :

- Le développement des communautés citoyennes d'énergies renouvelables : en définissant formellement des objectifs de production d'énergies renouvelables lors de la prochaine PPE. L'État devra ainsi mettre en œuvre les outils nécessaires pour soutenir cette production d'énergie verte par et pour tous ;
- Les fournisseurs de gaz naturel devront obligatoirement intégrer une part de biogaz dans le gaz qu'ils commercialisent.
- L'obligation d'installer des panneaux solaires ou des toits végétalisés pour :
 - 1° Les constructions de bâtiments ou parties de bâtiment à usage commercial, industriel ou artisanal, aux constructions de bâtiments à usage d'entrepôt, aux constructions de hangars non ouverts au public faisant l'objet d'une exploitation commerciale et aux constructions de parcs de stationnement couverts accessibles au public, lorsqu'elles créent plus de 500 mètres carrés d'emprise au sol .
 - 2° Les constructions de bâtiments ou parties de bâtiment à usage de bureaux, lorsqu'elles créent plus de 1 000 mètres carrés d'emprise au sol.

Ces obligations s'appliquent également aux extensions et rénovations lourdes de bâtiments ou parties de bâtiment lorsque ces extensions ou les rénovations concernées ont une emprise au sol de plus de 500 mètres

carrés, pour les bâtiments mentionnés au 1° du présent II, et de plus de 1 000 mètres carrés, pour les bâtiments mentionnés au 2° (Article L171-4 du Code de la Construction et de l'Habitation).

Dans le cas d'un bâtiment mixte, l'article R171-32 précise qu'il est soumis à obligation si au moins la moitié de sa surface de plancher est affectée à un ou plusieurs des usages listés ci-dessus.

Loi d'Accélération de la Production d'Énergie Renouvelable (APER)

La loi APER, promulguée le 10 mars 2023, vise à faciliter l'accélération de la production d'énergies renouvelables sur le territoire français. Elle engage les collectivités à réaliser une planification territoriale des énergies. Cette loi s'accompagne de dispositifs juridiques et financiers pour favoriser l'émergence des projets d'énergies renouvelables, électriques et thermiques, sur terre et en mer.

La Loi APER complète la Loi Climat Résilience sur les obligations de solarisation :

- L'installation d'ombrières photovoltaïques sur au moins la moitié de la surface des parkings de plus de 1 500 m² est obligatoire.
- Les obligations de solarisation des bâtiments neufs de la Loi Climat et Résilience doivent être étendues aux bâtiments déjà existants à partir de 2028 et aux constructions de bureaux créant plus de 500m² d'emprise au sol. Les décrets et arrêtés d'application ne sont pas encore parus. Le taux de solarisation à respecter n'est donc pas encore connu.

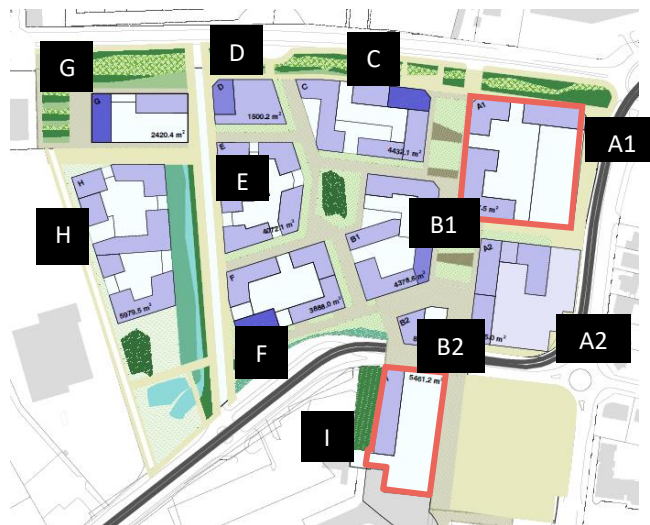


Figure 4 : Bâtiments concernés par une obligation de solarisation

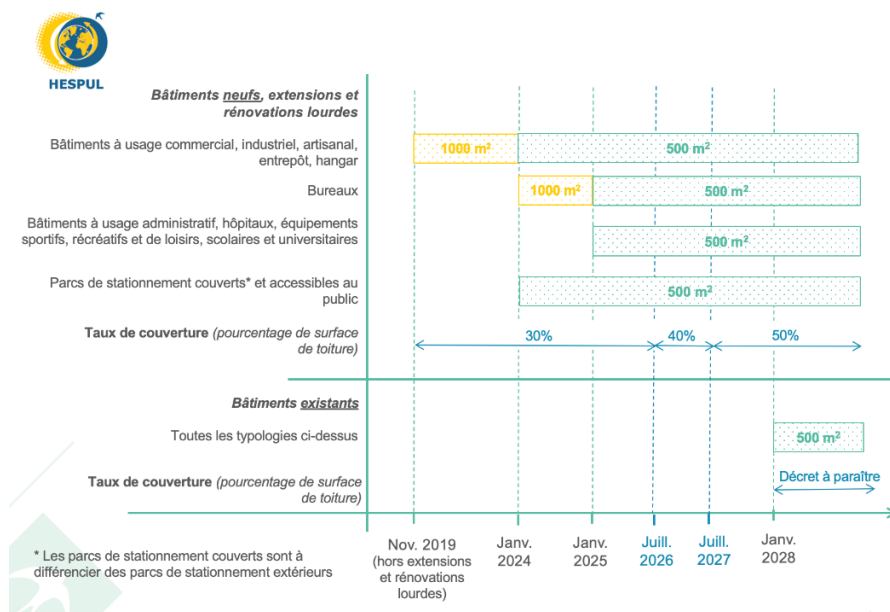


Figure 5 : Schéma de synthèses des obligations de solarisation – HESPUL

En raison de leur programmation, les bâtiments A1 et I seront soumis à une obligation de solarisation ou de végétalisation.

RE2020

Conformément au décret n° 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementales des constructions de bâtiments en France métropolitaine, de nouvelles exigences encadrées par la RE2020 sont entrées en vigueur depuis le 1er janvier 2022 pour la construction de bâtiments ou parties de bâtiments à usage d'habitation, et s'appliqueront à partir au 1er juillet 2022 aux constructions de bâtiments ou parties de bâtiments de bureaux, ou d'enseignement primaire ou secondaire. La RE2020 renforce les attentes sur le volet énergétique des constructions neuves selon cinq leviers d'actions principaux :

- **L'optimisation de la conception énergétique du bâti indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre** : les besoins bioclimatiques des logements (Bbio max) sont abaissés de 30 % pour tous les logements par rapport aux exigences de la RT2012.
- **La limitation de la consommation d'énergie primaire (CEP) et d'énergie primaire non renouvelable (CEP nr)** : ce nouvel indicateur (CEP nr) a notamment pour but d'éviter la mise en œuvre de chauffage électrique par effet joule et de limiter les solutions tout gaz afin de s'orienter vers des solutions plus vertueuses type géothermie, biomasse, réseau de chaleur.
- **La limitation de l'impact sur le changement climatique associé à ces consommations d'énergie (Ic_{énergie})** : la RE2020 fixe des seuils d'émission de GES pour réduire puis exclure progressivement l'usage des énergies fossiles comme source d'approvisionnement énergétique principale.
- **La limitation de l'impact des composants du bâtiment sur le changement climatique (Ic_{construction})** : la RE2020 impose désormais une Analyse de Cycle de Vie basée sur un modèle dynamique et fixe des seuils d'émission à ne pas dépasser pour les produits de construction, favorisant ainsi les

matériaux stockant le carbone ou autrement dit les matériaux biosourcés (laine de bois, chanvre, bois...).

- **La limitation des situations d'inconfort dans le bâtiment en période estivale** : la RE2020 supprime l'indicateur de Température Intérieure de Confort (TIC) de la RT2012 et crée un indicateur Degrés-Heures calculé par simulation thermique dynamique permettant de caractériser le confort estival des constructions.

En 2025, 2028 puis 2031, la RE2020 imposera de nouveaux seuils carbonés différenciés selon la typologie de bâtiments, pour l'énergie comme pour la construction.

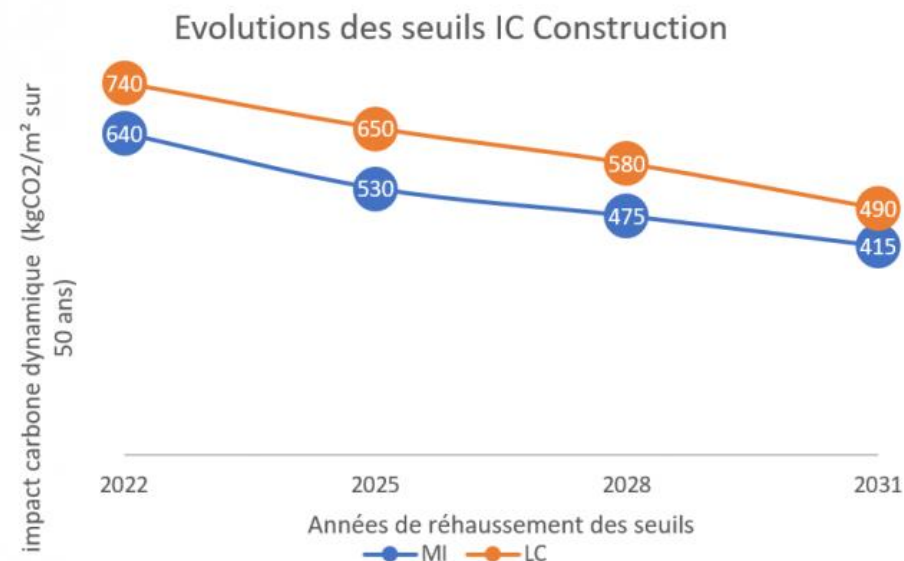
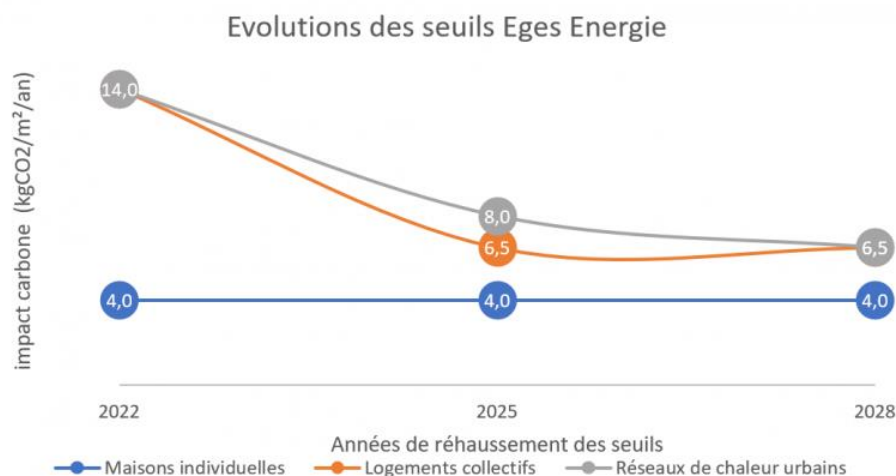


Figure 6 : évolution des seuils réglementaires IC construction et IC Energie — cegibat.fr

1.2.2 Les ambitions du territoire

Le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable, et d'Égalité des Territoires (SRADDET)

Le SRADDET de la région Pays de la Loire détermine les orientations à suivre pour opérer une transition environnementale afin de tendre vers la neutralité carbone. Les objectifs fixés sont de réduire la consommation énergétique de 50%, et les émissions de gaz à effet de serre de 80% d'ici à 2050. La production d'énergies renouvelables et de récupération est prévue à la hausse pour atteindre 100% de consommation d'énergie finale du territoire issue des EnR&R.

Le Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET)

Le PCAET de Nantes Métropole 2024 – 2030 a été adopté le 4 avril 2025. Il formalise les engagements de Nantes Métropole en matière de transition énergétique, d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, et d'amélioration de la qualité de l'air.

Sur le volet énergétique, le PCAET fixe deux objectifs :

- Atteindre 20% de production locale d'énergie renouvelable dans le mix énergétique en 2030 ;
- Atteindre 100% des consommations d'énergie finale issue des énergies renouvelables en 2050.

De plus, le PCAET définit les zones d'accélération de la production des énergies renouvelables qui découlent de la loi APER. Parmi les zones recensées, l'opération Cholière Angevine et Morlière-Thébaudières fait partie des zones identifiées pour le développement :

- des réseaux de chaleur (le site a été précédemment identifié dans le cadre du Schéma Directeur des Réseaux de Chaleur). La biomasse et la géothermie sont les deux énergies privilégiées pour l'opération ;
- du solaire en toiture.

Le Plan Local d'Urbanisme intercommunal de Nantes Métropole

Le PLUm de Nantes Métropole a été adopté le 5 avril 2019.

Le PADD souligne la volonté du territoire de s'inscrire dans une dynamique de transition avec une orientation qui engage le territoire à agir contre le changement climatique et à s'adapter à ses effets. Le PADD met en avant la volonté de concevoir des aménagements bioclimatiques, d'intégrer l'adaptation au changement climatique dans les projets, de favoriser la production locale d'énergies renouvelables, d'améliorer l'efficacité énergétique, ...

Deux objectifs chiffrés sont inscrits dans le PADD :

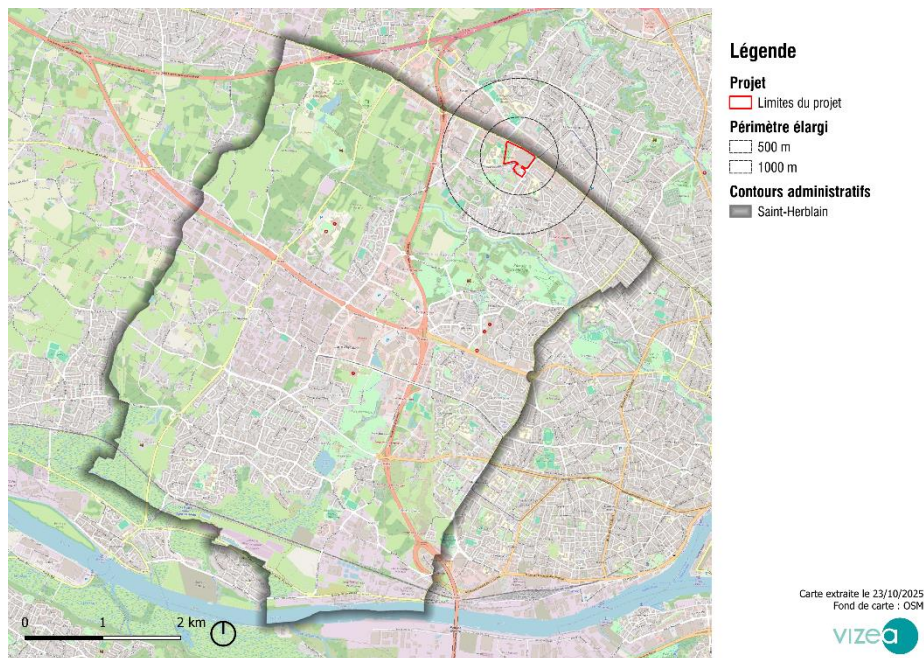
- Diminuer de 50% par habitant les émissions de gaz à effet de serre entre 2003 et 2030
- Atteindre 20% d'énergies renouvelables locales à horizon 2030

Ces prescriptions sont également traduites par une OAP (orientation d'aménagement et de programmation) Climat Air Energie, à travers des recommandations sur la conception bioclimatique, la mise en œuvre d'énergies renouvelables, le développement d'une mutualisation énergétique entre les bâtiments.

Le projet n'est pas concerné par une OAP sectorielle.

1.3 Localisation de la zone d'étude

La commune de Saint-Herblain se trouve dans la métropole de Nantes, dans le département de Loire-Atlantique. Le projet se trouve au nord de la commune, à l'interface avec la commune d'Orvault.



Le site n'est pas situé dans un périmètre de protection d'un site inscrit ou protégé au titre des monuments historiques.

1.4 Contexte énergétique territorial

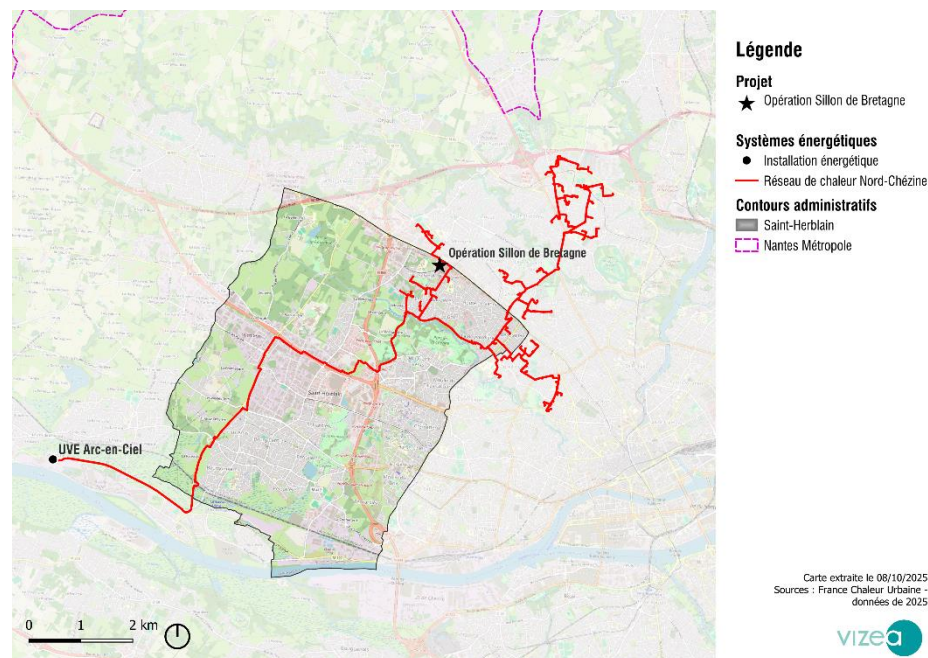
Les sources de production locale d'énergie en Loire-Atlantique sont recensées par l'observatoire TEO.

L'ensemble des productions locales d'énergie sur la commune et aux alentours sont représentées ci-après.

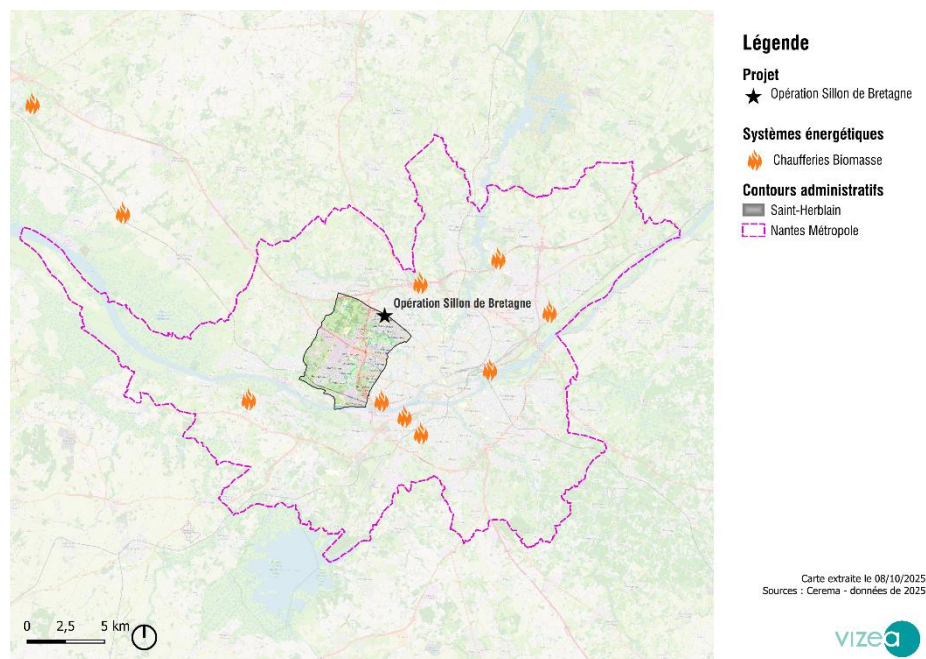
Unité de valorisation énergétique (UVE)

La commune de Saint Herblain est desservie par le réseau de chaleur Nord Chézine, alimenté par le Centre de Traitement et de Valorisation des déchets « Arc-en-Ciel » situé sur la commune voisine de Couëron. Ce centre produit chaque année 30 GWh d'électricité et 75 GWh de chaleur sous forme de vapeur et dessert les habitants de la métropole de Nantes via le réseau de chaleur Nord-Chézine.

Le site d'étude se trouve à 8,3 km de l'UVE Arc-en-ciel.



Installations biomasse



Aucune chaufferie biomasse n'est présente sur la commune. Huit chaufferies sont toutefois présentes au sein de la métropole nantaise pour une puissance totale installée de 62 MW.

Installation photovoltaïque

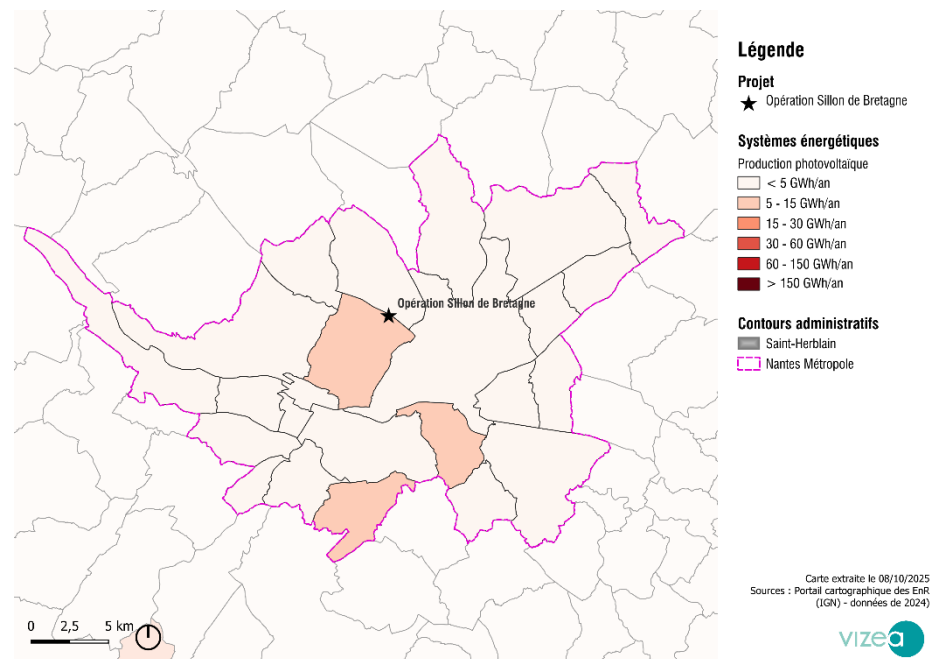


Figure 8 : Production solaire photovoltaïque basse tension (>36 kVa en haut, <36 kVa en bas) en 2022 - Vizea d'après OEB

La production photovoltaïque de Saint-Herblain est de 9 GWh par an, ce qui en fait la première commune de la Métropole en matière de production photovoltaïque. Les communes limitrophes ont une production allant de 0,2 à 3,4 GWh.

Installations de l'éolien

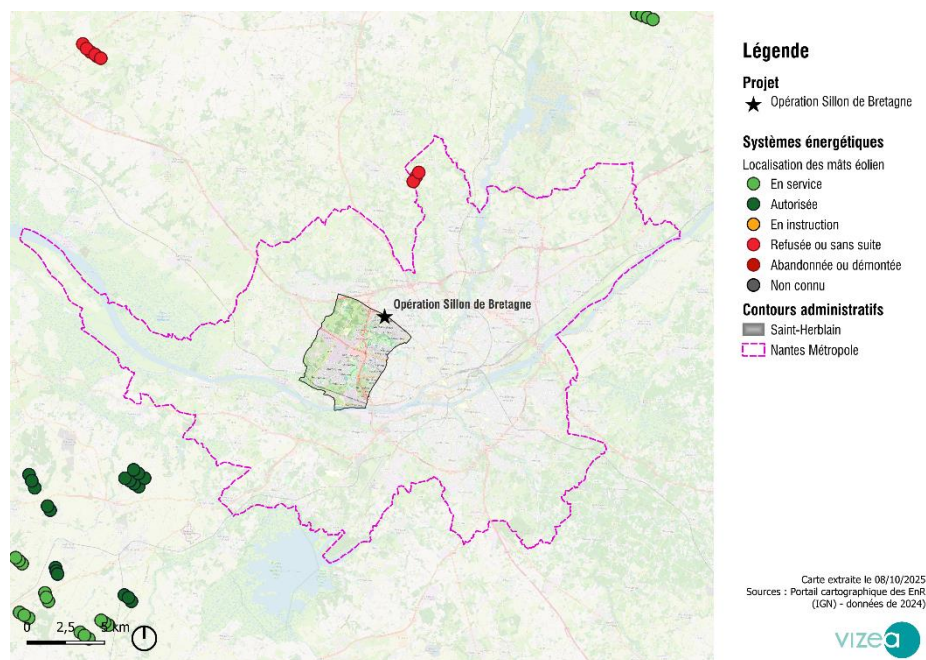


Figure 9 : Localisation des mâts d'éoliennes - Vizea d'après des données de l'IGN

La commune ne possède pas d'installations éoliennes. Aucune éolienne n'est en activité au sein de Nantes Métropole. Des installations éoliennes sont présentes plus au sud-ouest de Saint-Herblain, à environ 12 km.

Installations hydroélectriques

Le territoire de Nantes Métropole ne dispose pas d'installation hydroélectrique.

Installations de géothermie

A l'échelle de la métropole, environ 600 sondes géothermiques sont recensées. De la géothermie sur nappe est également présente sur la nappe d'eau de la Loire et alimente l'hôtel de Région situé sur l'île de Nantes, et à terme le futur CHU. La production de géothermie sur nappe est de 3,3 GWh de chaud et 2,7 GWh de froid.

Sur la commune de Saint-Herblain, 17 installations géothermiques sur sondes sont présentes. La géothermie sur nappe n'est pas une énergie exploitée sur la commune.

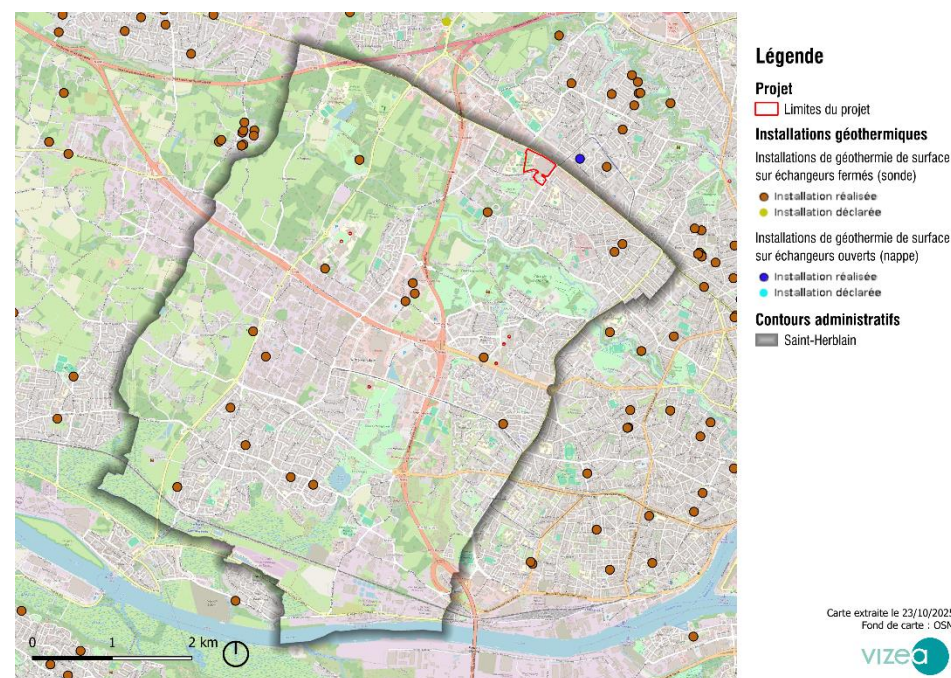


Figure 10 : Installations géothermiques (En bleu : sur nappe, En orange/jaune : sur sonde) – Géothermies.fr (données de 2025)

La plateforme Cartodim élaborée par l'ADEME et le BRGM pour recenser les tests de réponse thermique recense un test sur la commune de Saint-Herblain. Les résultats suivants ont été enregistrés :

Tableau 1 : Résultat du test de réponse thermique réalisé à Saint-Herblain - Géothermie

Identifiant du forage	BSS002PTHG
Equipement de la sonde	Double U
Profondeur	150 m
Durée du test	72 h
Température initiale moyenne du terrain	13,35 °C
Conductivité thermique moyenne estimée	3 W/K.m
Résistance thermique moyenne estimée	0,11 K.m/W
Capacité calorifique volumique estimée	2,55 MJ/K.m ³

2. ANALYSE DES BESOINS ENERGETIQUES

2.1 Descriptif des besoins

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 est donc 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 : rafraîchissement 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.



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 ou la RE (éclairage, ventilation et auxiliaires), mais inclut également les consommations d'électricité dites spécifiques, qui comprennent les besoins électriques des appareils électroménagers, des équipements multimédias, etc.

2.2 Programmation

La programmation par secteur est décrite ci-après :

- 1248 logements collectifs (70 868m²) dont :
 - o 826 logements familiaux (53 711m²)
 - o 421 logements en résidences gérées (17 157m²)
- 23 153m² de commerces
- 3 914 m² de tertiaire et services
- 1723 places de stationnement

2.3 Hypothèses générales

Les ratios de consommation choisis pour estimer les besoins énergétiques sont les suivants. Ils sont exprimés en kWh/m². Il est choisi de ne pas prévoir de climatisation pour les logements et le tertiaire.

Typologie	Chauffage	ECS	Froid	Electricité
Habitat collectif	21,56	22	0	25
Tertiaire	26,95	1,65	0	50
Commerce	37,73	8,8	40	45
Hôtellerie	26,95	28,875	20	30

2.4 Evaluation des besoins énergétiques

Les besoins des îlots de l'opération sont exprimés ci-après en MWh/an :

Ilot	Chaleur	ECS	Froid	Electricité
Ilot A1	412	221	269	509
Ilot A2	129	110	29	150
Ilot B	365	318	73	425
Ilot C	342	264	114	400
Ilot D	37	9	39	44
Ilot E	116	118	0	134
Ilot F	217	193	38	252
Ilot G	189	151	56	221
Ilot H	290	296	0	337
Ilot I	409	155	353	486
Total	2505	1835	973	2958

2.5 Projets environnants et bâtiments existants

Le périmètre d'étude comprend plusieurs bâtiments existants :

- La galerie commerciale Le sillon Shopping (correspondant au bâtiment I sur le plan)
- Le parking silo associé à la galerie (correspondant aux bâtiments A1 et A2 sur le plan)

Le chauffage de l'ensemble de la galerie commerciale est produit par un convecteur électrique, une chaudière individuelle gaz, une PAC eau glycolée/air et une Centrale à Traitement d'Air (CTA). Une pompe à chaleur et une CTA sont également utilisées pour le refroidissement.

En 2022, la consommation électrique est de 1,3 MWh.

Les bâtiments étant partiellement chauffés au gaz, il est pertinent de l'inclure dans une réflexion de mutualisation énergétique avec les futurs bâtiments. Cela permettrait ainsi de décarboner l'énergie de la galerie commerciale.

2.6 Construction de la stratégie énergétique

La construction d'une stratégie énergétique cohérente repose sur plusieurs leviers. En effet, cette stratégie ne doit pas seulement concerner la production d'énergie renouvelable mais doit absolument intégrer les consommations et besoins en amont.

Il faut donc dans un premier temps évaluer les objectifs du projet en fonction de la consommation d'énergie en favorisant la sobriété et l'efficacité énergétique.

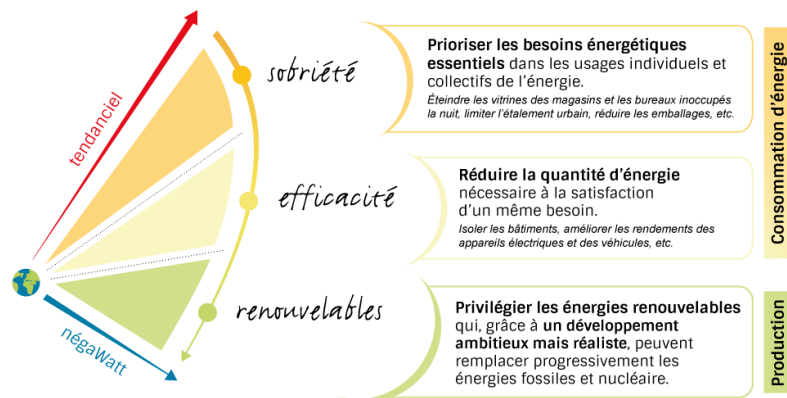


Figure 12 : Illustration sobriété, efficacité énergétique et énergies renouvelables – Association Negawatt

La sobriété est une démarche de modération sur les services par la consommation d'énergie qui consiste en une utilisation réfléchie de l'énergie utilisée avec une priorisation des besoins.

Les énergies renouvelables sont sollicitées dans un second temps, pour satisfaire les besoins énergétiques qui ne peuvent être évités. Il est par exemple difficile de réduire le besoin d'ECS en phase conception (lié aux usages uniquement), alors qu'il est aisé de réduire considérablement les besoins de chauffage (bioclimatisme, étanchéité à l'air, isolation, etc.) et de froid (protections solaires, free-cooling, etc.). Les énergies renouvelables permettent toutefois de couvrir ces consommations avec des impacts environnementaux réduits par rapport aux énergies fossiles.

3. INVENTAIRE DU POTENTIEL EN ENERGIE RENOUVELABLES

3.1 Contexte climatique du site

Le département de Loire-Atlantique est situé en région Pays de la Loire, son climat est de type tempéré océanique.

Les données météorologiques prises en compte dans le cadre de cette étude sont celles de la station météo Nantes-Atlantique située 10 km au Sud du site.

Les températures sur le territoire sont douces et s'élèvent en moyenne à 12,7°C.

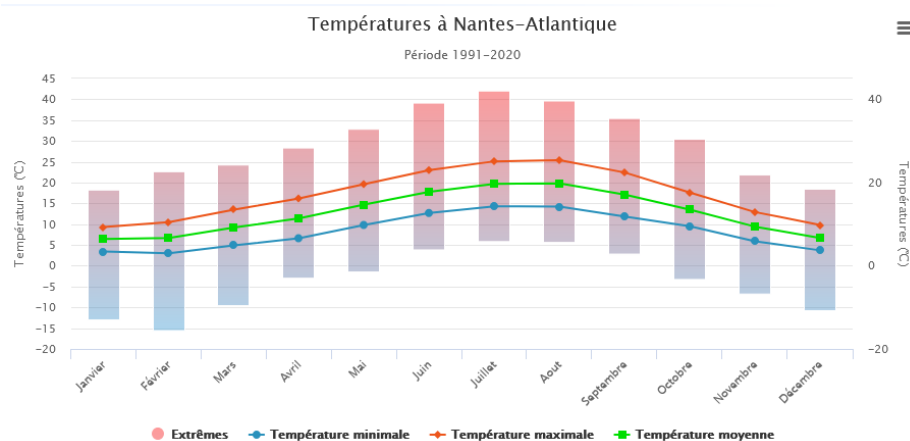


Figure 13 : Températures moyennes à Nantes-Atlantique - Source : Infoclimat

L'ensoleillement sur une année est d'environ 1 908,6 heures, pour 1990,2 heures en moyenne en France.

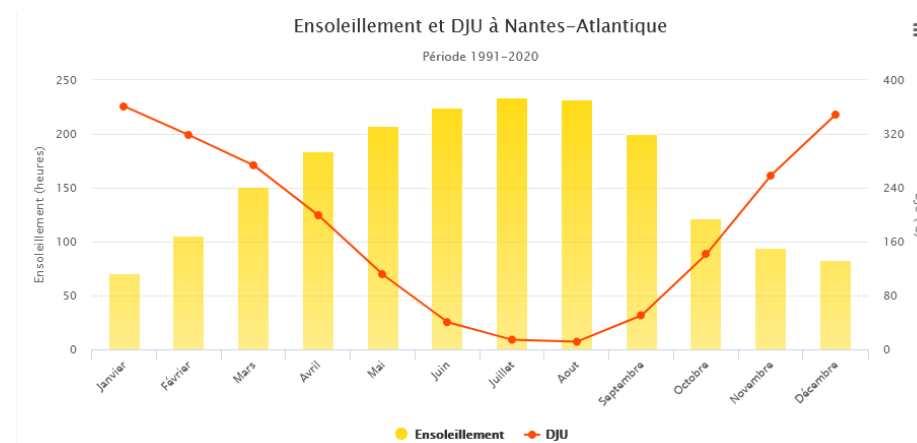


Figure 14 : Ensoleillement moyen à Nantes-Atlantique - Source : Infoclimat

Les précipitations sont régulièrement réparties tout au long de l'année. Elles varient entre 44,2 mm en juillet et 101 mm en décembre. Ces précipitations annuelles atteignent une hauteur de 819,5 mm en cumul moyen sur l'année.

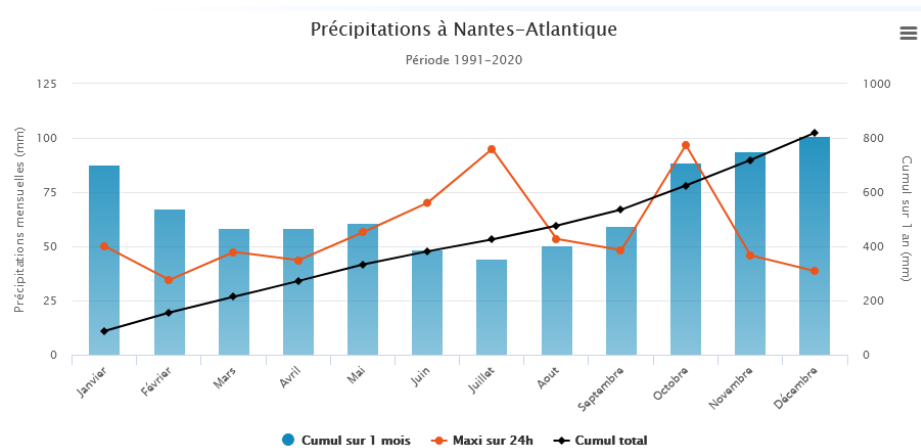


Figure 15 : Pluviométrie à la station Nantes-Atlantique - Source : Infoclimat

Les vents dominants, dans la région du site, sont des vents de secteur Sud-Ouest et Nord-Est. Les vitesses annuelles recensées s'élèvent à 8kts soit 14,8 km/h, des rafales de 25 kts (46 km/h) en moyenne sont enregistrées, les plus fortes entre février et mars.

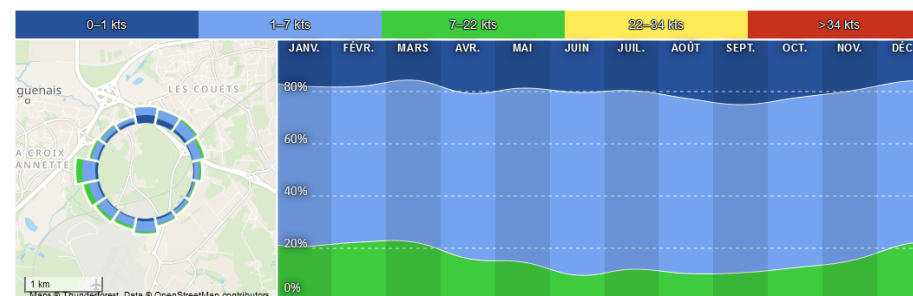


Figure 16 : Roses des vents à la station Nantes-Atlantique – Source : Windfinder

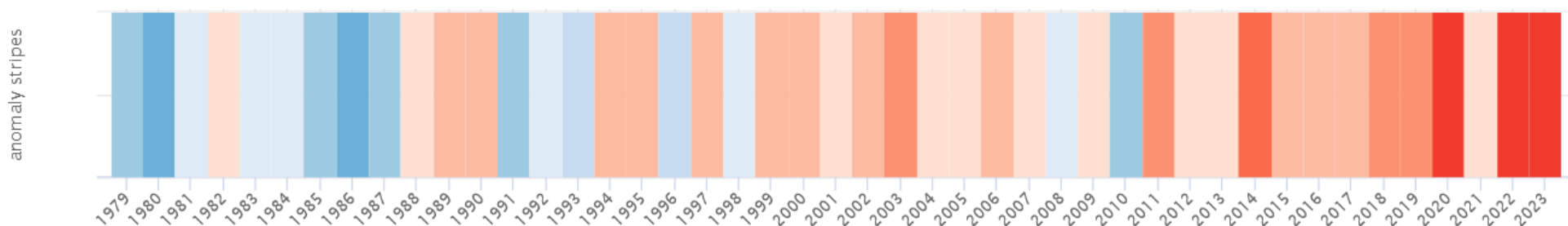


Figure 17 : Evolution des anomalies de températures moyennes à Saint Herblain – Source : Météoblue d'après les données de Météo France

L'évolution des températures annuelles moyennes est représentée sur la

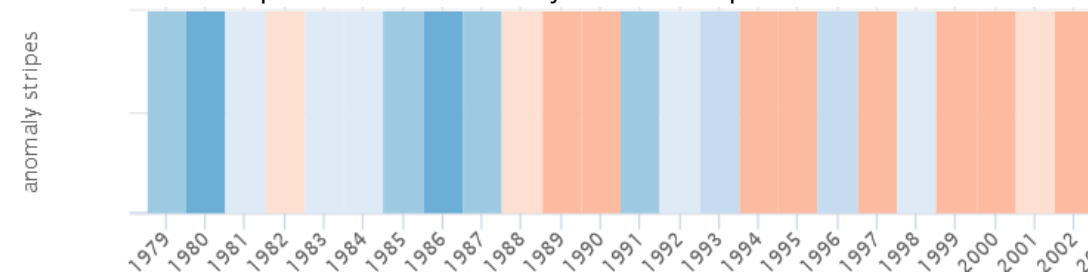


Figure 17 et témoigne de l'importance de la prise en compte du dérèglement climatique lors de la conception du projet. L'élévation des températures moyennes, l'augmentation de la fréquence des fortes chaleurs, canicules et autres événements extrêmes doivent ainsi être des éléments de réflexion qui guideront les aménagements et permettront une adaptation et une limitation des impacts conséquente.

3.2 Les réseaux de chaleur

3.2.1 Les réseaux de chaleur existants

A l'échelle de la commune

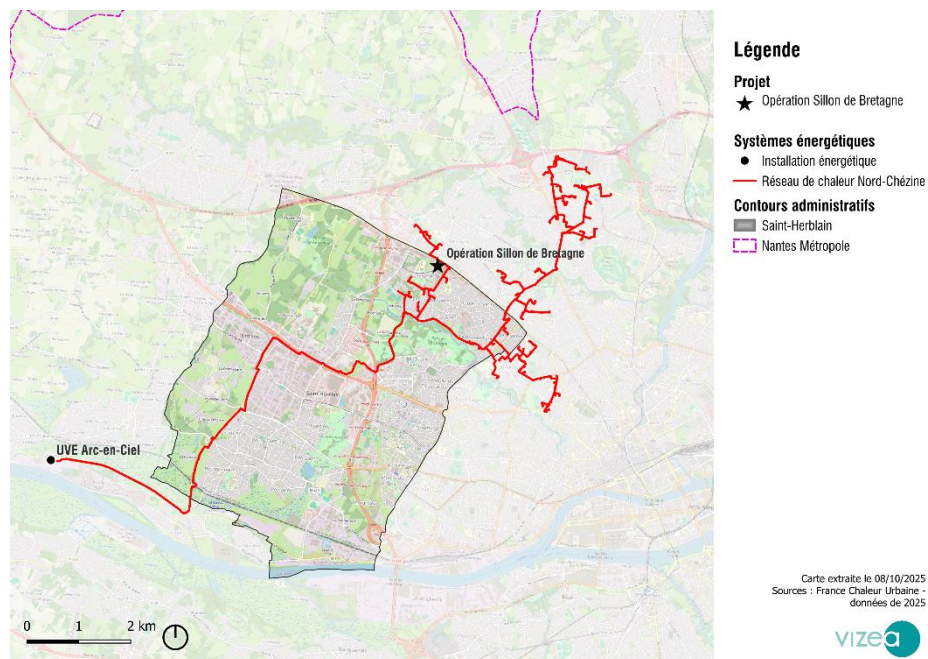


Figure 18 - RCU Nantes Nord Chézine (Source : France Chaleur Urbaine, 2025)

Le réseau de chaleur Nord-Chézine qui dessert en grande partie la ville de Saint-Herblain est alimenté par le Centre de Traitement et de Valorisation des Déchets Arc-en-Ciel situé sur la commune de Couëron à 8,1 km de l'opération.

Le Réseau Nord-Chézine

Le Réseau de Nord-Chézine est un réseau non classé. Il est composé à 74,2 % d'EnR grâce à un mix énergétique composé de gaz (25,8%) et d'énergie valorisée par le centre Arc-en-Ciel (74,2%)

Le réseau mesure 30 km de long et produit 79,5 GWh/an pour alimenter 79 points de livraison. La puissance totale installée est de 94,2 MW.



Figure 19 - RCU Nantes Nord Chézine à proximité du projet (Source : France Chaleur Urbaine, 2025)

Le réseau de chaleur est déjà à proximité immédiate du site de l'opération, une extension est prévue en 2027 et desservira l'intérieur du site.

Etant donné la proximité du RCU, un raccordement du projet serait pertinent.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Raccordement à un réseau de chaleur existant	Quartier Commune	- Mutualisation de l'approvisionnement énergétique - Approvisionnement vertueux - Présence d'un réseau à proximité	- Temporalité de raccordement

3.2.2 Création d'un réseau de chaleur

Dans le but de mutualiser les équipements de production de chaleur, il est possible d'implanter un réseau de chaleur au sein de la zone étudiée.

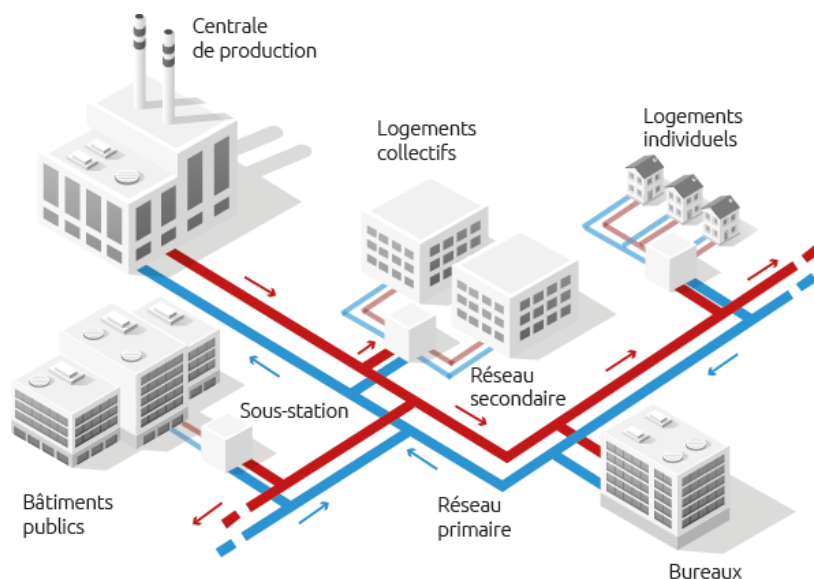


Figure 20 : Principe de création d'un réseau de chaleur

La pertinence d'un réseau de chaleur se mesure par la densité énergétique linéaire de ce dernier. Ce ratio se calcule de la manière suivante : besoin en chaud (chauffage et ECS) / longueur du réseau de chaleur. La viabilité de cet équipement est reconnue et donc soutenue financièrement par l'ADEME à partir de 1,5 MWh/ml.an. Les installations récentes disposent généralement d'une densité entre 3 et 6 MWh/ml.an. Les pertes liées à la distribution du réseau peuvent être prises en compte, elle augmente la densité énergétique du réseau de 10 à 15%.

Un réseau de chaleur permet de valoriser les énergies renouvelables et de récupération disponibles localement comme la chaleur fatale industrielle, la géothermie, le solaire thermique ou le bois énergie. Le potentiel de ces énergies est détaillé dans la suite.

Compte-tenu de la présence d'un réseau de chaleur à proximité immédiate du site, cette solution ne sera pas retenue pour la suite de l'étude.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Création d'un réseau de chaleur	Quartier	- Mutualisation de l'approvisionnement énergétique - Approvisionnement vertueux - Maîtrise des systèmes énergétiques et des charges pour les futurs habitants - Réduction de la dépendance aux énergies fossiles si réseau vertueux - Potentielle subvention de l'ADEME	- Phasage du projet - Coût d'investissement pour la création du réseau - Nécessité de dégager une emprise pour l'unité de production énergétique

3.3 La géothermie

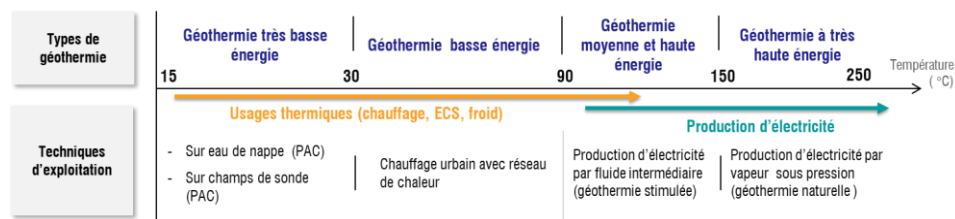


Figure 21 : Cartographie des différents types de géothermie

3.3.1 Géothermie basse énergie (sur aquifère profond)

La géothermie sur aquifère profond, ou géothermie basse énergie, repose sur l'utilisation directe de la chaleur de l'eau chaude contenue dans les aquifères (couches géologiques poreuses imprégnées d'eau) profonds. Le massif cristallin de la Bretagne dévoile vraisemblablement des aquifères superficiels discontinus qui se traduit par un potentiel géothermique sous formes de nappes d'eau peu profondes (< 1 000m) présentant des températures moyennes.

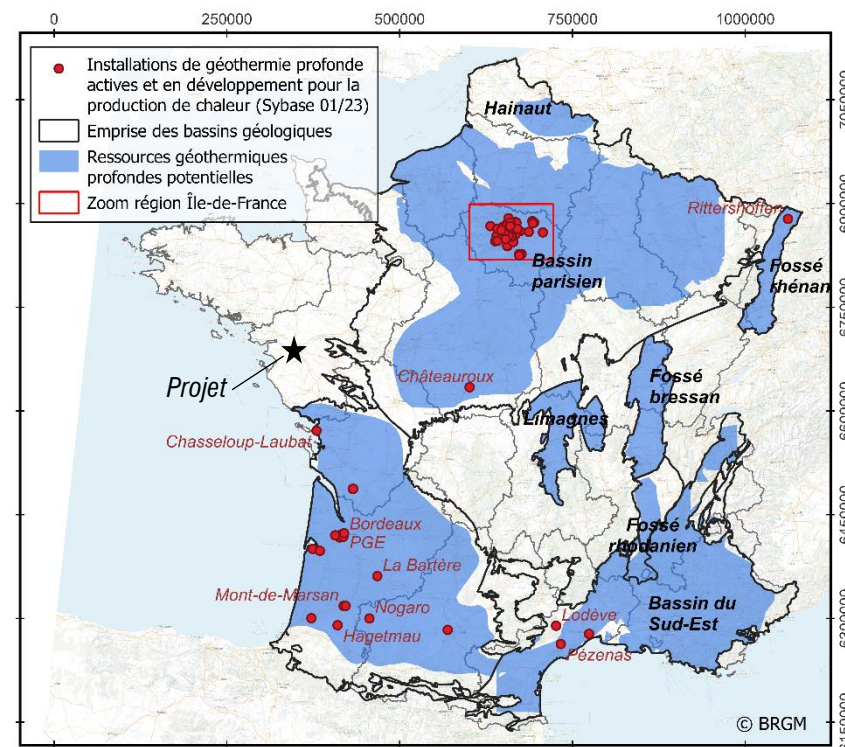


Figure 22 : Ressources en aquifères profonds en métropole et installations en fonctionnement – BRGM 2022

Les coûts d'investissement particulièrement importants de cette solution nécessitent des besoins de chaleur élevés afin de rentabiliser les investissements de forage. La mise en place d'un réseau de chaleur alimenté en géothermie profonde présente un réel intérêt économique à partir de puissances mises en jeu de l'ordre de 10 MW.

Cette solution n'est pas pertinente pour le projet puisque le potentiel de géothermie profonde est nul en Loire-Atlantique.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Géothermie basse énergie (sur aquifère profond)	Quartier Commune	- Production de chaud et de froid en géocooling - Très bon rendement	- Manque de ressource géothermique - Coûts d'investissements élevés

3.3.2 Géothermie très basse énergie (sur nappe superficielle)

Principe de fonctionnement

Une pompe à chaleur (PAC) sur nappe superficielle vient puiser des calories et/ou frigories dans une nappe située à une profondeur généralement inférieure à 100 mètres du niveau du sol. Ce système est réversible et permet de produire du chaud et du froid.

La géothermie sur nappe prend la forme d'un doublet de forage. Le premier forage dit de « captation », permet d'acheminer le fluide via un échangeur jusqu'à la PAC pour en prélever le froid (ou le chaud en mode chauffage). Le second forage dit de « réinjection » permet de renvoyer l'eau dans le sous-sol afin de limiter la perturbation de la nappe.

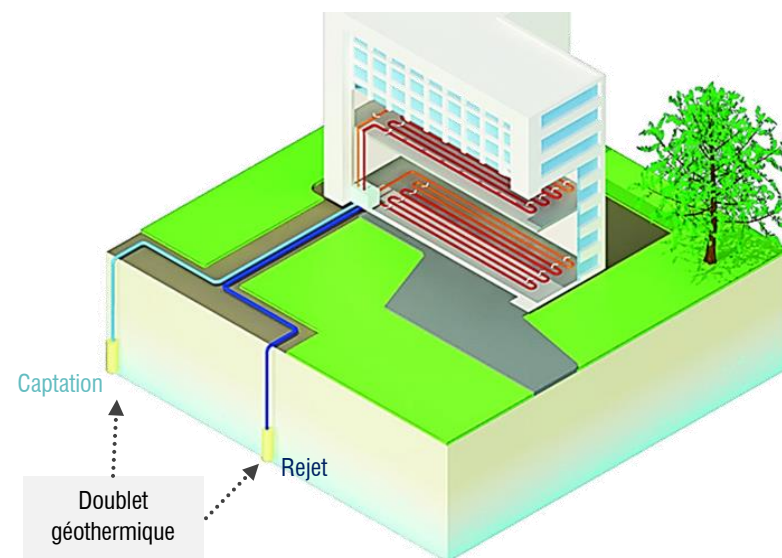


Figure 23 : Schéma de principe du fonctionnement PAC sur nappe - ADEME BRGM

Il est également possible d'utiliser l'installation sur nappe en mode géocooling, c'est-à-dire sans utiliser de pompe à chaleur (« by-pass ») en utilisant simplement l'échangeur. L'eau circule alors dans les canalisations à une température équivalente

à celle pompée. Ce système a l'avantage de limiter la consommation d'énergie pour faire fonctionner la pompe à chaleur. Le pouvoir de rafraîchissement est cependant moindre mais peut convenir selon les besoins.

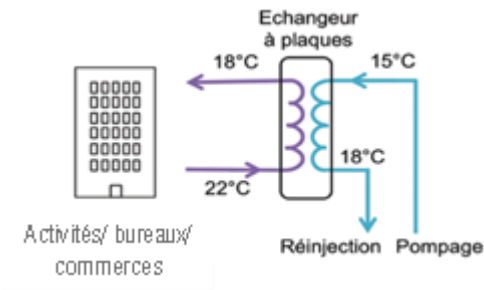


Figure 24 : Principe du géocooling – AFPG

Caractéristiques du territoire

Aucun ouvrage sur nappe n’est recensé sur la ville de Saint-Herblain par le BRGM. L’ADEME et le BRGM n’ont pas encore mis à disposition les informations soulignant le potentiel de la géothermie sur nappe dans les Pays de la Loire. Les caractéristiques des nappes ne sont pas disponibles actuellement, le sol de l’agglomération nantaise est principalement composé de granite, gneiss et schiste.

Opportunités sur le projet

La réalisation d’un forage test est nécessaire pour déterminer précisément la profondeur de la nappe, son débit, sa température, son sens d’écoulement et de caractériser le rabattement de la nappe.

Les informations n’étant pas suffisantes pour estimer le potentiel du site, cette solution n’a pas été retenue.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Géothermie superficielle/très basse énergie sur nappe	Bâtiment Îlot	- Production de chaud et de froid en géocooling - Très bon rendement	- Nécessite la réalisation d'un forage test pour valider la ressource disponible - Nécessite un appoint de production de chaleur pour couvrir l'ensemble des besoins

3.3.3 Géothermie très basse énergie sur champs de sonde

La géothermie sur champ de sondes consiste à faire circuler dans plusieurs sondes implantées dans le sol un fluide caloporteur en circuit fermé. Ce fluide caloporteur permet de capter la chaleur présente dans le sol.

Sondes horizontales

Les sondes horizontales sont le plus souvent utilisées pour des maisons individuelles avec un terrain disponible attenant. Les sondes horizontales requièrent un grand terrain par rapport à la puissance produite et sont donc plus adaptées à une disposition pour maisons individuelles que pour du collectif. En effet, 1 m² de forage correspond à une puissance disponible de 40W. Il est également estimé que la surface de capteurs horizontaux doit représenter 1,5 fois la surface à chauffer.

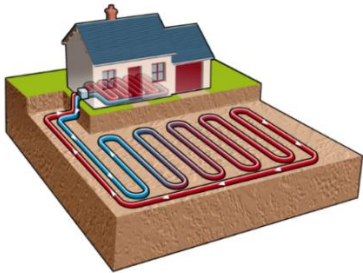


Figure 25 : Principe de la sonde géothermique horizontale

Sondes verticales

Les sondes implantées verticalement dans le sol, nécessitent un écartement minimum de 10 mètres entre elles afin de ne pas engendrer d'interférences thermiques. Une profondeur de 100 m est suffisante pour s'affranchir des variations de température journalières et saisonnières. La température est constante autour de 14°C. Une telle sonde correspond à une puissance géothermique de l'ordre de 5 kW.

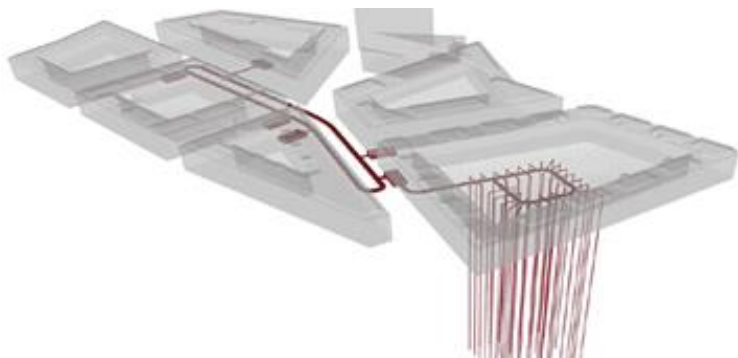
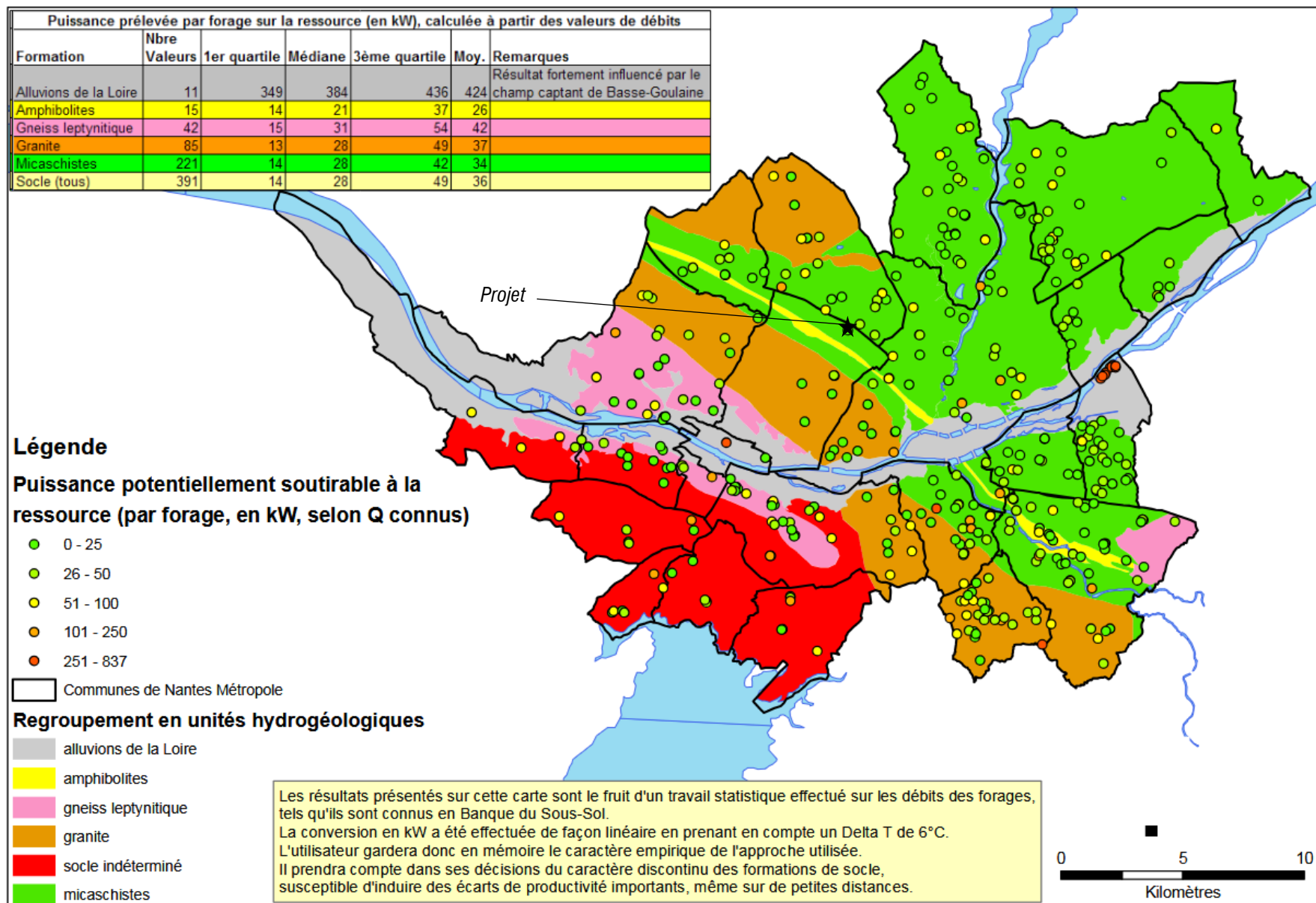


Figure 26 : Principe de la sonde géothermique verticale

Pour éviter un investissement et un nombre de sondes trop importants, ce système est généralement associé à une énergie d'appoint. Le recours à cette technologie constitue donc davantage une alternative de production énergétique qu'une source principale de production.

Une étude a été menée par le BRGM pour évaluer le potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole.



La géothermie sur champ de sondes consiste à faire circuler dans plusieurs sondes implantées dans le sol un fluide caloporteur en circuit fermé. Ce fluide caloporteur permet de capter la chaleur présente dans le sol.

La géothermie sur sonde est mobilisable sur le site d'étude. En revanche, au regard du nombre de sondes nécessaires pour couvrir l'ensemble des besoin du site, ce système pourra plutôt être utilisé en énergie d'appoint et/ou uniquement pour les besoins en froid.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Géothermie sur champ de sondes	Quartier Bâtiment	- Une solution de sondes verticales est plus adaptée à un projet de logements collectifs que des sondes horizontales - Production de chaud et de froid en géocooling - Très bon rendement	- Risque d'interférence entre les installations en cas de multiplication des ouvrages - Nombre de sondes proportionnelle à la puissance - Foncier nécessaire pour le système horizontal

3.3.4 Boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG)

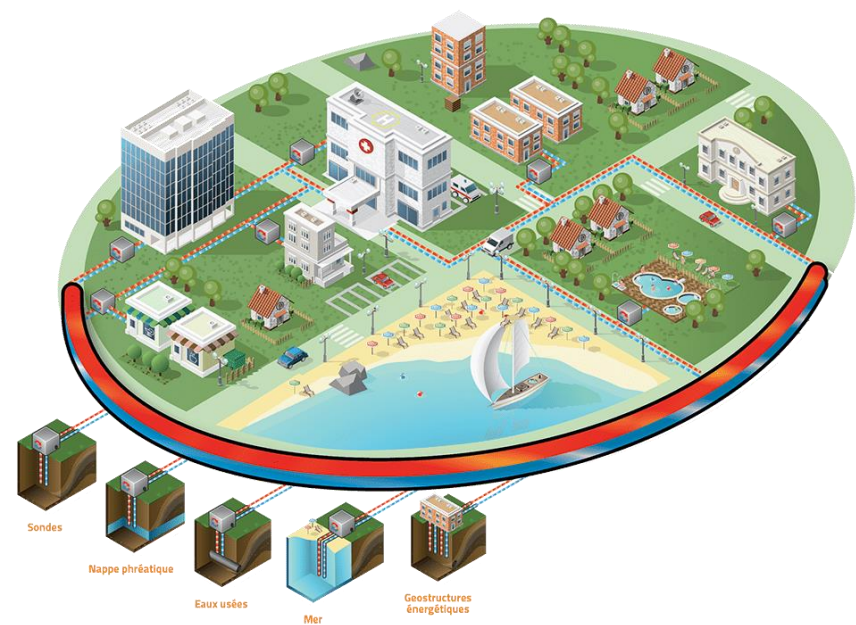


Figure 27 : Synoptique de la BETEG - AFPG

La boucle d'eau tempérée à énergie géothermique, dite BETEG, est assimilée à un réseau de chaleur. Elle est constituée :

- D'un dispositif de captage (ressource géothermique) ;
- D'un dispositif de mutualisation (boucle d'eau tempérée) ;
- D'un dispositif de production (thermopompe ou PAC géothermique eau/eau) ;
- D'un dispositif de régulation.

La BETEG se compose d'un réseau d'eau tempérée alimenté par une ou plusieurs ressources géothermiques couplées à des productions décentralisées. Il repose sur une distribution à basse pression d'une eau à très basse température (généralement

inférieure à 30°C) ce qui caractérise la notion d'eau tempérée distribuée dans le réseau. Ce réseau d'eau à très basse température alimente des sous-stations équipées de thermopompes eau/eau (PAC géothermique). Ces équipements de production décentralisée permettent une production de chaud, pour le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire (ECS), et de froid par bâtiment ou îlots de bâtiments. Le montage en « thermofrigopompe » de ces pompes à chaleur permet de répondre simultanément aux besoins de chaud et de froid en aval de la sous-station.

La configuration de ce réseau d'énergie unique permet de mutualiser les échanges thermiques entre bâtiments et sources d'énergie. En France, les réseaux de chaleur ont une densité thermique moyenne de 8 MWh/ml de réseau ; il n'est toutefois pas techniquement nécessaire d'atteindre de telles valeurs pour une BETEG, et la pertinence économique peut être avérée, même pour des densités inférieures à 1 MWh/ml.

Cette méthode de boucle tempérée alimentée par géothermie est une solution envisageable pour le projet.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG)	Quartier îlot	- Performances énergétique, économique et environnementale - Adaptabilité des besoins - Multiplication des sources d'énergies possibles	- Nécessite un appoint si besoin de haute température - Meilleure efficacité avec une mixité programmatique

3.3.5 Contexte réglementaire

Code minier

La géothermie est classée par le **code minier** sous plusieurs catégories dites :

- Géothermie haute énergie : exploitation des gîtes dont la température de leurs eaux, mesurée en surface est supérieure à 150°C ;
- Géothermie de basse température : exploitation des gîtes dont la température de leurs eaux, mesurée en surface est inférieure ou égale à 150°C. Les forages associés ont une profondeur inférieure à 1000 m ;
- Géothermie de minime importance : géothermie basse température mais se distingue par des technologies et des moyens plus légers mis en œuvre pour exploiter la ressource thermique. Les critères de la géothermie de minime importance sont définis dans le paragraphe II de l'article 3 du décret n°78-498 du 28 mars 1978 modifié. Les conditions de mise en œuvre sont précisées dans le décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.
- Géothermie de surface : située à moins de 10 mètres de profondeur. Les installations répondent aux conditions de l'article 2 du décret n° 78-498 du 28 mars 1978 modifié.

Géothermie de minime importance (GMI)

Une installation est considérée comme une installation géothermique de minime importance si elle respecte les contraintes suivantes :

- **Pour les systèmes fermés (i.e. sondes) :**
 - La profondeur du forage est comprise entre 10 et 200 mètres ;
 - La puissance thermique maximale prélevée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW ;

- La température du fluide caloporteur dans les sondes (boucle fermée) doit être comprise entre -3°C et $+40^{\circ}\text{C}$;

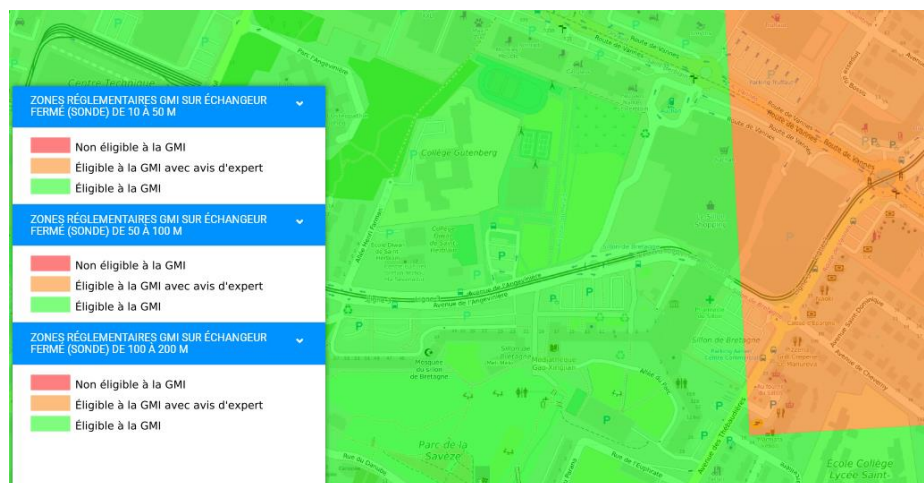


Figure 28 : Zones réglementaires GMI pour les échangeurs fermés de 10 à 200m

Le site n'est pas situé dans la zone rouge comme présenté dans la cartographie ci-dessus définie par l'arrêté du 25 juin 2015 relatif à la carte des zones en matière de géothermie de minime importance, distinguant trois types de zones, et révisée en 2022.

■ Pour les systèmes ouverts (i.e. sur nappe) :

- La profondeur du forage est comprise entre 10 et 200 mètres ;
- La puissance thermique maximale prélevée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW ;
- Les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs au seuil d'autorisation fixé à la rubrique 5.1.1.0 de l'article R. 214-1 du code de l'environnement, soit $80\text{ m}^3/\text{h}$;
- La température de l'eau prélevée en sortie des ouvrages de prélèvement est inférieure à 25°C .

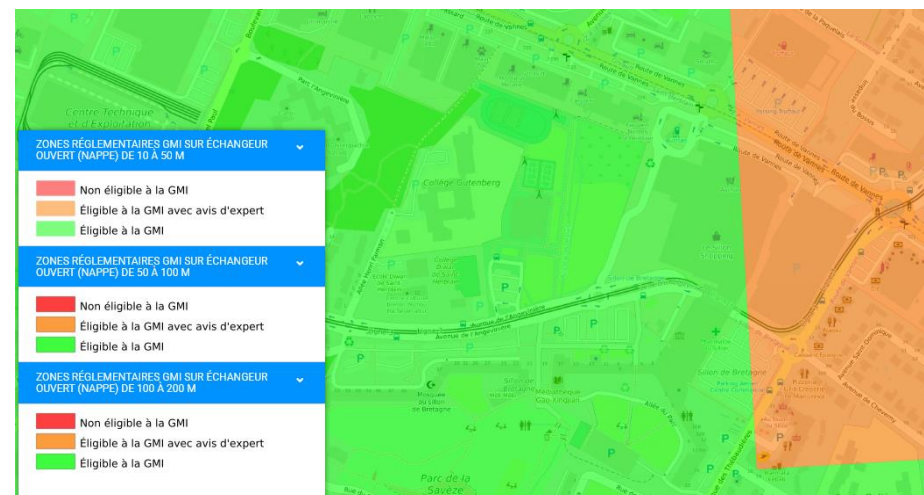


Figure 29 : Zones réglementaires GMI pour les échangeurs ouverts de 10 à 200m

Les gîtes géothermiques de basse température concernés par le régime de la minime importance tel que défini ci-dessus, doivent faire l'objet d'une télédéclaration sur le site internet geothermie.developpement-durable.gouv.fr.

La partie Ouest du périmètre du projet est située en zone verte pour la géothermie par échangeurs ouverts (géothermie sur nappe) jusqu'à 200 mètres, tout comme

pour les échangeurs fermés (géothermie sur sonde). La partie Est est en revanche éligible à la GMI uniquement avec avis d'expert

3.3.6 Géothermie hors minime importance

Si le projet est considéré hors géothermie de minime importance le dossier de demande d'autorisation devra contenir notamment :

- Une étude d'impact ou la mise à jour du volet géothermie de l'étude d'impact déjà existante
- Un document de sécurité et santé
- Les conditions d'arrêt des travaux
- L'évaluation des impacts sur la ressource en eau

La demande d'autorisation s'accompagne d'une enquête publique d'une durée de 1 mois. La décision est ensuite délivrée par arrêté préfectoral.

Il est à noter que le dépôt et l'instruction des permis de construire sont décorrélés du dépôt et de l'instruction des demandes d'autorisation au titre du code minier.

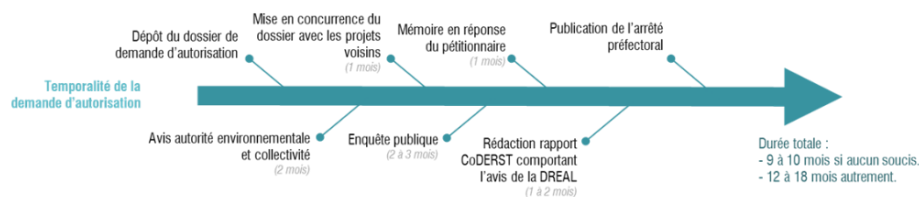


Figure 30 : Temporalité de la demande d'autorisation au titre du code minier

3.4 Aérothermie

Le principe de l'aérothermie est de capter les calories dans l'air extérieur pour assurer la couverture des besoins de chaleur.

Afin d'utiliser les calories présentes dans l'air, la mise en œuvre d'une pompe à chaleur (PAC) est nécessaire.

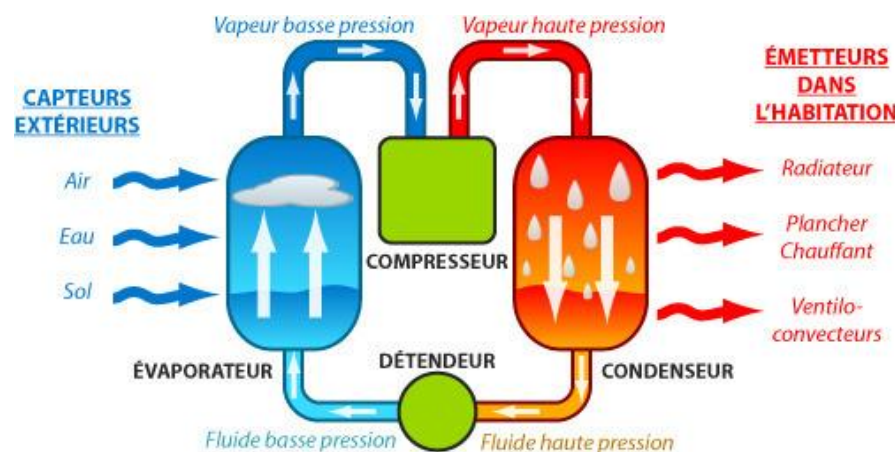


Figure 31 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

Les performances des PAC sont caractérisées par leur COP (Coefficient de performance) qui correspond à leur rendement. Il caractérise la relation entre les calories produites et l'énergie électrique utilisée (celle qui est facturée) pour un système de chauffage. Le COP d'une pompe à chaleur à air se situe généralement aux environs de 3.

Pour bénéficier d'un COP élevé, il faut que l'écart, entre la température de la source de chaleur captée par la PAC et la température de sortie, soit minime. Ainsi, pour améliorer le rendement d'une PAC, il est donc préconisé d'utiliser des émetteurs à chaleur douce (plancher chauffant, radiateur chaleur douce) au lieu de radiateurs haute température.

Il existe deux types de pompes à chaleur aérothermique :

- Les PAC air/air : les calories de l'air extérieur sont propulsées directement dans l'air ambiant de l'habitation (ventilo-convecteur).
- Les PAC air/eau : les calories de l'air extérieur sont injectées dans le réseau d'eau chaude (radiateurs, planchers chauffants, ...) de l'habitation.

Les PAC peuvent être utilisées pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire lorsqu'elles sont doubles services et également utilisées pour la production de froid. On parle alors de PAC réversible.

L'utilisation de l'aérothermie est adaptée au projet. Il est conseillé de privilégier des PAC possédant un COP d'au moins 3. La performance minimale des PAC aérothermiques n'est atteinte que pour les températures supérieures à 5°C.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Aérothermie	Bâtiment	- Utilisation des calories présentent dans l'air - Faible consommation d'énergie électrique - Pas d'émissions directes de polluant atmosphériques	- Rendement moins élevé que la géothermie - Rendement diminué lorsque les températures extérieures sont trop basses - Systèmes techniques à placer en extérieur

3.5 Les énergies de récupération

3.5.1 La récupération de chaleur 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 est particulièrement adapté aux logements collectifs avec une production centralisée de l'ECS.

Différents systèmes permettent la récupération des eaux grises :

- La **technologie type « Power-Pipe »** permettant par exemple de raccorder la plomberie de quatre appartements ou condominiums à un seul système qui récupère la chaleur de l'eau chaude issue des douches pour préchauffer simultanément l'eau du réseau. Cette technologie est adaptée pour les bâtiments collectifs d'un ou plusieurs étages, elle permet de récupérer jusqu'à 60 % de l'énergie évacuée. **Ce dispositif permet par ailleurs une réduction de 20 à 30 % sur les consommations d'ECS.** Ce dispositif possède un temps de retour sur investissement d'environ 8 ans, suivant les contraintes et les caractéristiques des projets.
- Le **système Biofluides ERS** permet également de récupérer la chaleur des eaux grises des bâtiments de taille significative ou ayant une forte consommation d'eau. Les eaux usées arrivent dans une cuve centrale. À l'intérieur de cette cuve sont placés des échangeurs dans lesquels circule un fluide caloporteur. Le filtre retient les plus grosses particules dans la cuve et une pompe déverse quotidiennement les résidus accumulés dans la cuve vers le collecteur. Les calories captées sont dirigées vers la pompe à chaleur qui produit de l'eau chaude sanitaire à 58°C. Cette eau chaude sanitaire est ensuite acheminée vers le ballon de stockage. Il faut compter environ 1500 euros par logement. Le système Biofluides ERS est éligible au Fond Chaleur de l'ADEME (jusqu'à 40%) et permettrait de faire une économie de 30 euros par mois sur la facture de chaque logement.

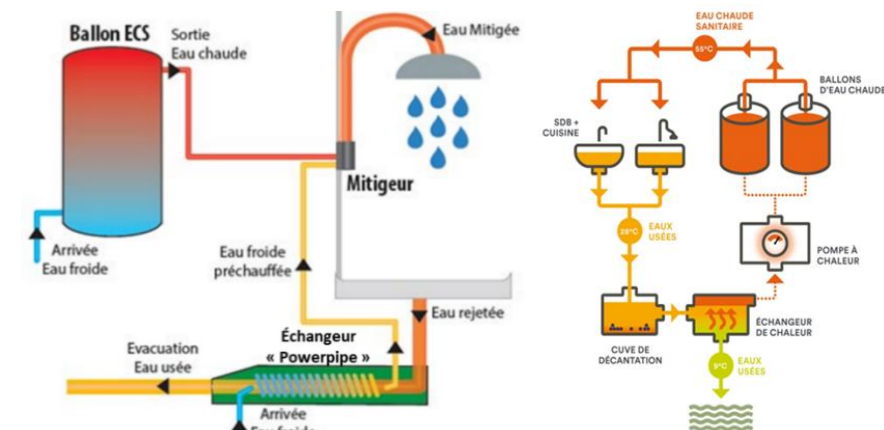


Figure 32 : Système de récupération de chaleur sur eaux grises – Powerpipe (gauche) / Biofluides ERS (droite)

Ces systèmes sont particulièrement adaptés pour les logements collectifs et présentent donc un intérêt pour le projet. La solution « Power-Pipe » est davantage adaptée aux logements intermédiaires. Le système Biofluides ERS permet quant à lui, de mettre en place une récupération de chaleur sur les bâtiments de logements collectifs présentant une plus grande consommation d'eau.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Récupération d'énergie sur eaux grises	Bâtiment	- Système passif et simple d'entretien - A minima 20% de réduction des consommations nécessaires pour couvrir les besoins en ECS (préchauffage)	- Nécessite 2 réseaux (séparation des réseaux eaux vannes et eaux grises) - Diminue la densité énergétique en cas de raccordement complémentaire à un réseau de chaleur - Système complémentaire nécessaire

3.5.2 La récupération d'énergie sur eaux usées urbaines

Lors de leur évacuation, les eaux usées ont une température moyenne comprise entre 10 °C et 20 °C (selon la région considérée et les saisons). Issues principalement des cuisines, salles de bains, lave-linge et lave-vaisselle, les calories des eaux usées peuvent être utilisées pour le chauffage ou le refroidissement des bâtiments. Fonctionnant sur le même principe qu'une VMC double flux pour l'air, un échangeur thermique permet de récupérer les calories dans les canalisations d'évacuation et de les transférer aux bâtiments via une pompe à chaleur.

Par ailleurs, le système est réversible. Il permet de rafraîchir les bâtiments en été lorsque la température des eaux usées est inférieure à la température intérieure des bâtiments.

Cette énergie possède différentes contraintes : le collecteur doit avoir un important diamètre, il doit être linéaire et non coudé sur une longueur suffisante et doit disposer d'un débit d'eaux usées suffisant. Il faut également vérifier les conséquences sur le fonctionnement de la STEP et le processus d'épuration, qui peut être perturbé par l'abaissement de la température en sortie de l'échangeur. Cette technologie peut alimenter un réseau de chaleur ou des bâtiments individuellement. Les utilisateurs de la chaleur doivent être à proximité du réseau d'eaux usées. Pour une optimisation optimale, les circuits de chauffage et d'ECS doivent être en basse température. Quant à l'échangeur, il dispose d'une durée de vie de 30 ans.

La récupération de chaleur dans les réseaux d'eaux usées peut se faire grâce à un échangeur intégré au sein de la canalisation, ou grâce à un échangeur déporté.

○ Réalisation d'un échangeur thermique intégré au réseau

L'échangeur peut être soit ajouté dans les canalisations existantes, soit directement intégrés dans les canalisations neuves lors de leur fabrication. Sur de l'existant, la fixation de l'échangeur au radier du collecteur entraîne une perte de section et une modification du profil hydraulique.

Les conditions minimales nécessaires à la mise en place de ce type de solution énergétique sont :

- Un débit supérieur ou égal à 12 L/s, soit un bassin versant amont d'environ 8 000 habitants,
- Une distance entre le réseau d'eaux usées et les locaux à chauffer limitée à 200 - 300 m,
- Pour les réseaux existants, un diamètre de collecteur supérieur ou égal à 800 mm,
- Pour les réseaux neufs, un diamètre de collecteur supérieur ou égal à 400 mm.

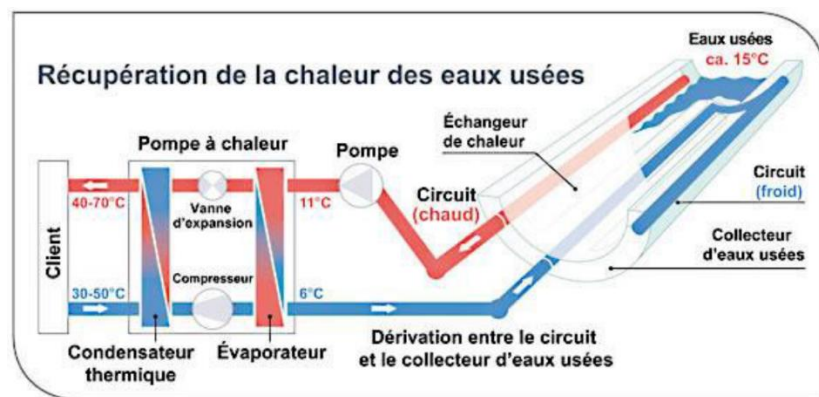


Figure 33 : Exemple de principe de récupération de la chaleur des eaux usées – Véolia

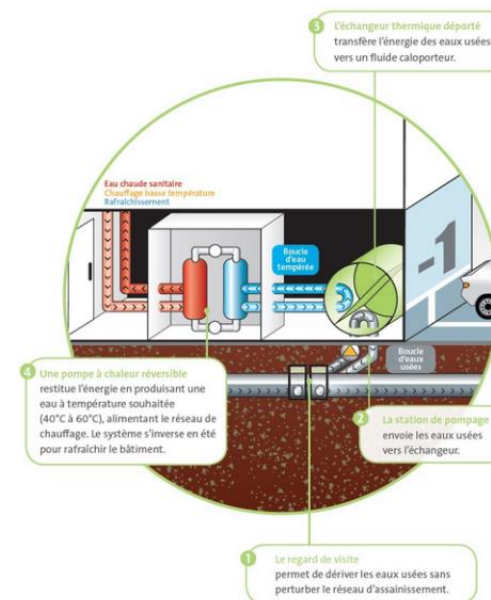


Figure 35 : Exemple de récupération de chaleur sur un collecteur avec échangeur déporté - Véolia

La connaissance de l'état actuel des réseaux et la présence ou non d'un collecteur unitaire au sein du quartier ou à proximité directe pourra permettre d'évaluer précisément les potentiels de récupération, en prenant en compte le débit mesuré dans le ou les éventuels réseaux présents.

La proportion de bâtiments à usage d'habitation dans le projet (53%) rend cette option intéressante.



Figure 34 : Ajout de l'échangeur dans les canalisations existantes et échangeurs intégrés dans le neuf

- **Réalisation d'un échangeur déporté (ex-situ)**

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Récupération d'énergie sur eaux usées (STEP)	Quartier	- Récupération d'énergie fatale - Intéressant compte tenu de la proportion de logement dans le projet	- Solution ne pouvant être mise en place en cas d'absence d'un réseau et débits adaptés - Echangeur intégré aux réseaux : solution complexe à mettre en œuvre - Nécessité de vérifier la possibilité de la mise en place de ce système vis-à-vis de la STEP

3.5.3 La récupération de chaleur 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 36 : Exemple de système de récupération d'énergie sur groupe froid - Ridol Energie

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.

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

La faisabilité de cette solution est fonction de la programmation, de la présence de bâtiments mêlant habitations et activités et dépend des besoins en froid des activités. Cette solution peut être adaptée au projet en raison de la mixité programmatique du projet. L'opportunité sera à étudier à l'échelle de chaque bâtiment, et n'est pas retenue dans la suite de la présente étude.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Récupération d'énergie sur groupe froid	Îlot	- 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 - Couverture des besoins dépendants des besoins en froid des activités

3.5.4 Récupération de chaleur fatale sur les datacenters

Les datacenters sont des sites physiques qui hébergent les systèmes nécessaires au fonctionnement d'applications informatiques. Ils permettent de stocker et de traiter des données et sont constitués de composants informatiques (comme les serveurs et les éléments de stockage) et d'éléments non informatiques (comme les systèmes de refroidissement aussi appelés groupes froid). Abritant ainsi une forte densité d'équipements informatiques, leur demande est constituée à la fois d'électricité, mais surtout d'évacuation de la chaleur. La chaleur fatale rejetée par le data center peut atteindre 18° à 25°C. Lors de mise en place d'un système de récupération de la chaleur fatale, une pompe l'achemine vers le réseau urbain. Pour

assurer le chauffage des bâtiments et de l'eau de la ville, sa température est poussée à 70°C grâce à une pompe à chaleur.

L'ADEME subventionne les projets mettant en œuvre la récupération de chaleur fatale via le financement Fonds Chaleur.

Aucun data center n'est présent à proximité du projet.

Aucun data-center n'est présent à proximité, cette solution n'est pas pertinente pour le projet.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Récupération d'énergie sur datacenter	Îlot	- Synergie entre datacenters et production de chaleur - Récupération d'énergie fatale - Aides de l'ADEME pour financer les projets	- Absence de datacenter à proximité du projet

3.5.5 Chaufferie numérique

Il est possible de réduire les consommations d'eau chaude sanitaire en mettant en œuvre une « chaudière numérique ». Cette solution très innovante, s'avère être simple et responsable, car elle valorise l'énergie fatale dégagée par des serveurs informatiques pour préchauffer l'eau chaude sanitaire à hauteur de 50%.

La société NEUTRAL-IT, qui commercialise le produit, se préoccupe donc d'héberger des données sur disques durs dans une « boîte » à l'intérieur même de la chaufferie. La chaleur ainsi dégagée est récupérée et acheminée vers un ballon de stockage.

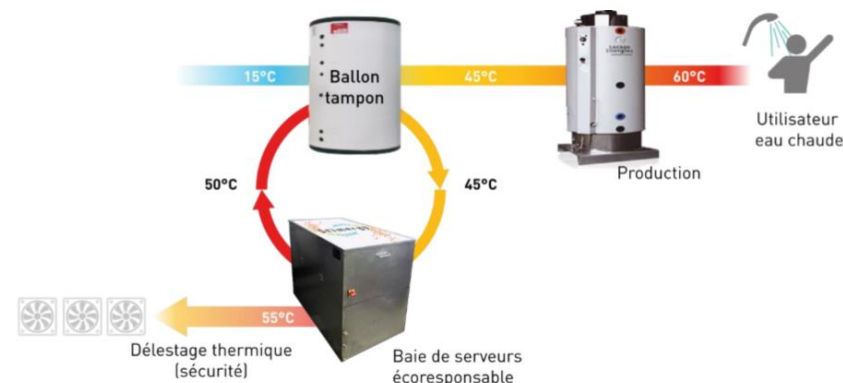


Figure 37 : Schéma de principe de la chaudière numérique

La sécurité et la maintenance de l'installation sont assurées par la société en direct. Le réseau secondaire, en sortie de chaufferie est traditionnel avec une distribution des logements via les gaines techniques, avec individualisation des charges. Ainsi, à l'image d'un réseau de chaleur, la chaudière numérique offre l'avantage de fournir une quantité de chaleur annuelle garantie de manière contractuelle par la société.

Les prérequis pour l'installation de cette solution sont :

- Un local aux normes chaufferie
- Une hauteur sous plafond minimum de 2.20m
- Un préparateur ballon ECS pour collectif
- Un système de ventilation haute et basse
- Une résistance au sol supérieure à 500Kg/m²
- Une arrivée hydraulique pour connecter l'échangeur
- Une arrivée électrique depuis un point de livraison dédié à la salle serveurs
- Un lieu d'implantation éligible à la fibre et une réservation câblage pour la fibre numérique

Cette solution est particulièrement intéressante pour réduire la consommation en ECS, qui est indépendante de la performance du bâti. Cependant compte tenu des de la programmation, il n'y aura pas de serveurs informatiques dégageant une grande quantité d'énergie sur site.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Chaudière numérique	Îlot	- 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 - Couverture des besoins dépendants des besoins en froid des activités - Non applicable à la programmation du projet

3.6 Le bois énergie

3.6.1 Ressource

Le bois énergie est la source renouvelable la plus utilisée en France. Les solutions techniques ont fortement évolué, ce qui a eu pour conséquence l'automatisation des chaudières fonctionnant à la plaquette forestière ou aux granulés ainsi que l'amélioration des performances énergétiques et environnementale des systèmes.

Les perspectives de développement du bois énergie sont importantes et la montée en puissance rapide des projets de chaufferie biomasse sur le territoire pose la **question de la capacité de la filière à alimenter les nouveaux projets dans la durée**. L'essor de la filière doit être accompagné par une maîtrise de la conception des systèmes mis en place à cause du risque de dégradation de la qualité de l'air lors de la mise en place d'équipements non performants.

Deux scénarios tendanciels ont également été analysés à l'horizon 2035 :

- Un scénario de sylviculture constante, qui correspond à un scénario de base simulant un maintien des pratiques actuelles de gestion (les taux de coupe observés sur la période 2005 – 2013 sont appliqués sur la période 2016 – 2035) ;
- Un scénario de dynamisation progressive de la gestion forestière. L'hypothèse retenue consiste à intensifier globalement la gestion forestière

en généralisant progressivement les pratiques identifiées comme les plus dynamiques.

Un schéma régional biomasse 2018-2023 a été réalisé pour dresser un état des lieux plus précis de la filière et de son potentiel de mobilisation. Les ressources du territoire permettent le développement de la filière bois énergie.

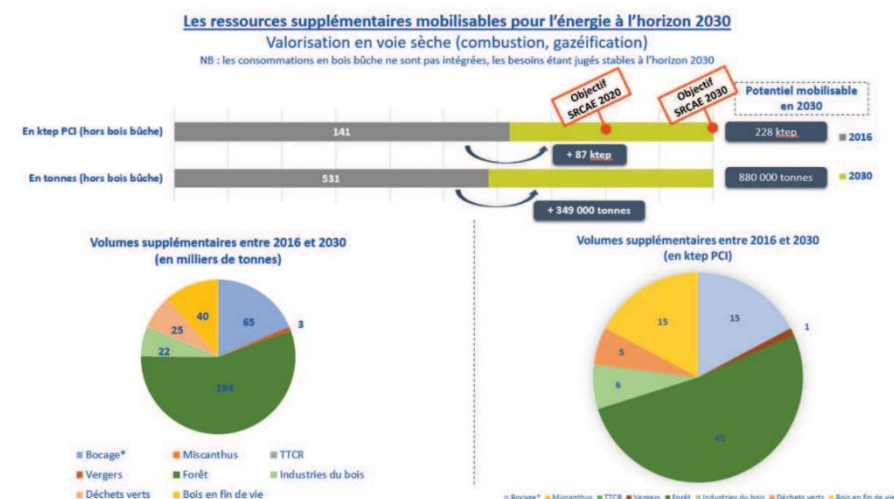


Figure 38 : Ressource disponible pour le bois énergie à horizon 2030 - SRB Bretagne

3.6.2 Equipement collectif

Dans le cas d'installations à grand échelle (logements collectifs ou quartiers), lorsque la puissance de chaud est supérieure à 200 kW, il devient nécessaire d'adopter le principe de la biénergie et de sous-dimensionner les chaudières bois. Ce procédé consiste à mettre en cascade la chaudière bois avec une autre technologie productrice de chaleur, qui va jouer le rôle d'appoint et de secours. Ce montage intervient pour deux raisons :

- Le dimensionnement d'une chaudière se base sur les conditions empiriques (températures extrêmes en hiver et appel maximal de puissance simultanément dans tous les locaux). Or ces conditions sont réunies deux

à trois fois par an. Il ne devient donc pas pertinent d'investir pour une forte puissance de chaudière bois alors que la capacité totale ne serait utilisée que pour des périodes très ponctuelles.

- Ce montage permet de faire fonctionner la chaudière bois à pleine charge le plus longtemps possible, ce qui implique un meilleur rendement et une plus longue durée de vie. Ainsi, l'appoint est actif lors des pics de consommation ou lorsque les besoins en chaleur sont très faibles (en effet la chaudière bois se dégrade également en sous-régime).

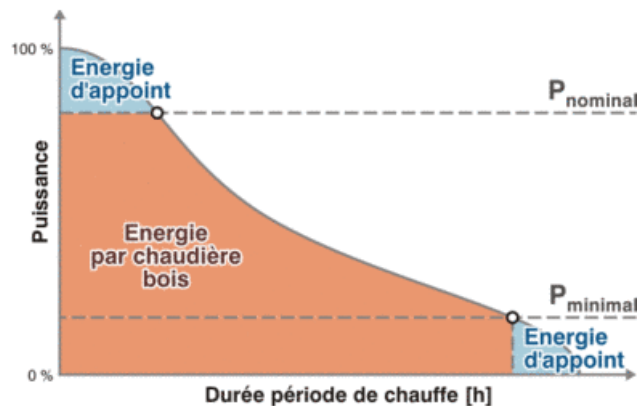


Figure 39 : Courbe d'appel de puissance chaudière bois

Ce dimensionnement, qui s'effectue sur la base d'une courbe d'appel de puissance mois par mois, permet à l'énergie bois de couvrir 80% des besoins de chauffage et ECS avec seulement 50% de la puissance maximale appelée. Ainsi, la chaudière bois est utilisée au maximum de son rendement et l'appoint assure le complément pour les jours les plus froids. Les principaux organes d'une telle installation sont le silo qui permet le stockage du bois, le convoyeur qui achemine le bois (avec une vis sans fin ou un tapis), la chaudière bois qui est le foyer de la combustion, et enfin un système d'épuration des rejets gazeux et d'évacuation des cendres.

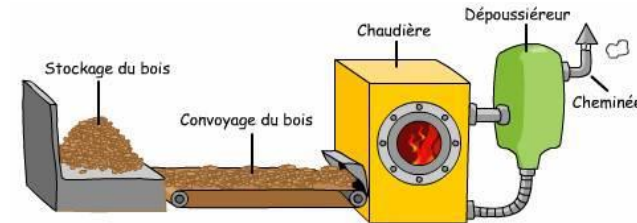


Figure 40 : Segments composant une chaudière bois

Le dimensionnement de la puissance d'une solution énergie bois est également essentiel pour assurer une bonne combustion du bois et une réduction des polluants nocifs pour la santé (particules fines, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, monoxyde de carbone, composés organiques volatils, oxyde d'azote). Les installations à fortes puissances (chaudières collectives, chauffage urbain) ont des conditions de combustions plus favorables et sont donc souvent moins émettrices de polluants que les chaudières bois-énergie individuelles.

La conception doit être étudiée soigneusement, et toutes les questions nécessaires pour développer une chaufferie fonctionnelle doivent être posées et résolues en amont du projet. En effet, la reprise des erreurs après la mise en service des chaudières est très complexe et extrêmement coûteuse. Ainsi quelques règles doivent être respectées :

Le silo :

La capacité d'un silo doit être dimensionnée par rapport aux besoins de chaque opération. Compte tenu des pertes inévitables dans les angles du silo, du fait qu'un silo n'est jamais rempli en totalité et que l'on n'attend jamais l'épuisement du combustible pour commander une livraison, un coefficient de remplissage de 60 % semble approprié. Ainsi, le volume utile d'un silo de 100m³ n'est que de 60m³. Le dimensionnement du silo doit être prévu pour des volumes utiles permettant des livraisons soit de 30m³, soit de 60m³ ou de 100m³, ce qui correspond au volume de livraison habituel des camions standard. L'accès au silo est la problématique la plus rencontrée dans les défauts de conception. L'accès des camions doit être mûrement planifié :

- Quel type de camions va venir livrer ?

- Est-ce que le camion peut manœuvrer facilement ?
- La trappe de livraison est-elle suffisamment dimensionnée ? (Optimal 3m x 2m)
- Le camion peut-il benner sans difficulté ? (Débord de toiture, gouttières, muret à proximité, etc.)
- Que se passe-t-il en cas de conditions météorologiques défavorables ? (Neige, vent, etc.)

Le lien entre le silo et la chaufferie est également indissociable et l'implantation sera déterminée par les conditions d'accès, la configuration du bâtiment et le terrain. Une bonne implantation est la condition de réussite du projet. Dans le cadre du déversement des plaquettes, les principales configurations sont les suivantes :

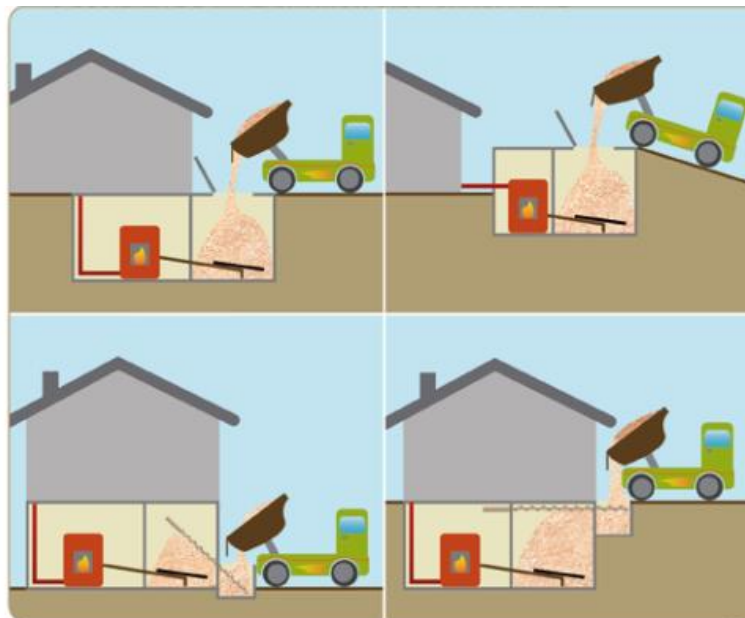


Figure 41 : Possibilité d'implantation pour les chaudières moyennes et grandes puissances

Pour le soufflage des granulés, le silo doit de préférence être accolé à un mur extérieur dans lequel seront fixés les embouts de remplissage. En raison de la longueur de flexible limitée, le silo doit être éloigné au maximum de 30 mètres du point de remplissage.

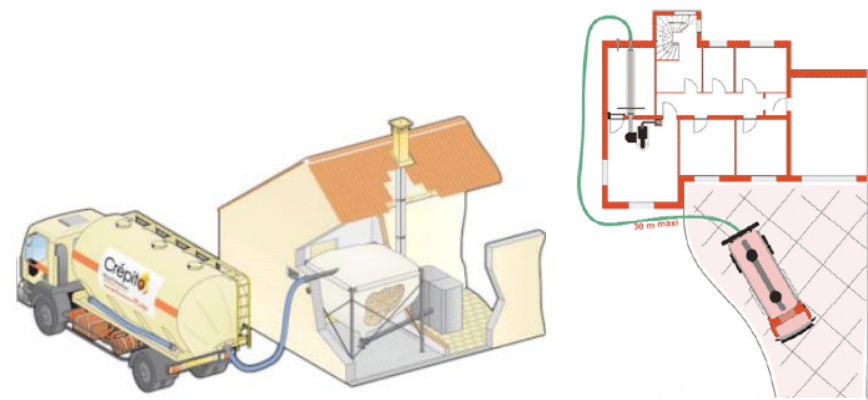


Figure 42 : Caractéristiques du soufflage de granulés

La chaufferie :

La chaufferie doit avoir une surface nécessaire pour prendre en compte l'encombrement de la chaudière mais également les dégagements obligatoires pour assurer l'exploitation et la maintenance des installations :

L'accès à la chaufferie est aussi un paramètre important, qui mal pensé, peut devenir une difficulté majeure. L'évacuation des cendres est un exemple de problèmes que l'on rencontre résultant d'une mauvaise conception : il est très délicat de sortir un bac à cendre de 30 kg sur roulette par une rampe d'escalier (cas d'une chaufferie en sous-sol). De même une rampe d'accès non couverte peut rapidement devenir impraticable en cas de chute de neige. Les eaux de ruissellement doivent être traitées avec la plus grande attention pour qu'elles ne prennent pas directement le chemin de la chaufferie. Comme pour le silo, il convient de bien maîtriser ces éléments en amont et de se mettre à la place de l'exploitant qui assurera le suivi au quotidien.



Figure 43 : Exemple de chaufferie biomasse – Ecole Polytech, Nantes – Vizea

Autre exemple dans le cas où la solution d'une chaufferie collective serait retenue sur le projet, les caractéristiques techniques suivantes permettent de donner des guides pour intégrer au plus tôt cette dernière au projet urbain :

- Dimension du silo : entre 400 et 500 m³ pour une autonomie de 5 jours
- Dimension de la parcelle pour la chaufferie : entre 300 et 400 m²
- Hauteur du bâtiment : 5 m minimum
- Ecartement de 10 mètres minimums de la chaufferie à prévoir par rapport aux limites de propriété des Établissement Recevant du Public (ERP), des immeubles de grande hauteur, des immeubles habités ou occupés par des tiers et des voies à grande circulation.



Figure 44 : Exemples de chaufferies biomasse collectives

3.6.3 Un réseau de chaleur Bois-énergie à l'échelle quartier

En cas de mise en place d'un réseau de chaleur à l'échelle du quartier, l'utilisation de la ressource bois-énergie est possible pour alimenter ce réseau de chaleur.

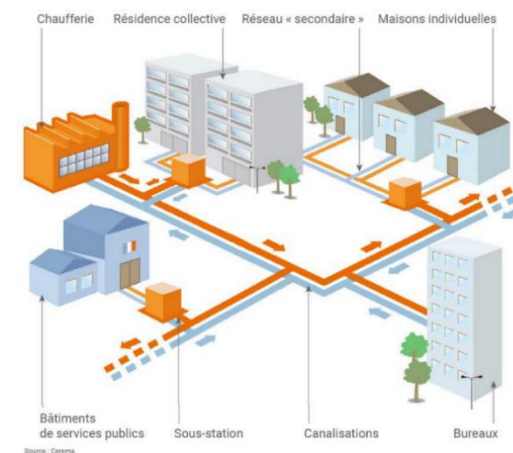


Figure 45 : Principe de fonctionnement d'une chaufferie et de son réseau de chaleur

L'investissement pour une chaufferie bois étant assez importante, il est opportun de mutualiser les équipements en raccordant différents bâtiments à travers un réseau de chaleur. La densité énergétique doit être optimisée en raccordant un maximum de besoins de chaud sur une distance de réseau la plus faible. Au regard de la densité moyenne du réseau de chaleur cette solution pourrait être peu avantageuse économiquement.

Un équipement collectif implique une consommation relativement importante et donc un approvisionnement en combustible en conséquence. Un équilibre est à trouver entre la place dédiée au stockage de combustible et la fréquence de livraison du bois.

Le bois énergie, et en priorité la plaquette forestière, peut donc être utilisé comme ressource principale d'un réseau de chaleur.

Du foncier doit être dédié à l'emplacement de la chaufferie, soit au sein d'un bâtiment existant, soit dans un bâtiment dédié en fonction de la puissance nécessaire.

Le réseau de chaleur présente l'avantage de disposer d'une seule installation à suivre. Ainsi, les gestionnaires des bâtiments sont déchargés de l'exploitation du réseau primaire (réseau qui va de la chaufferie jusqu'à l'échangeur de chaleur dans le bâtiment), et se contentent seulement d'acheter la chaleur consommée.

Des sous-stations avec un échangeur de chaleur sont placées à chaque entrée de bâtiment. Elles représentent l'équivalent d'une chaudière sur le bâtiment considéré. Les moyens de production étant délocalisés, elles nécessitent qu'une très faible emprise foncière.

L'implantation d'une chaufferie peut être contraignante en termes d'emprise au sol mais les bénéfices environnementaux et énergétiques sont également importants. Cette solution pourra être pertinente pour le projet.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Réseau de chaleur Bois énergie	Îlot Quartier	- Possibilité de massifier le taux d'énergies renouvelables - Données environnementales bonnes - Meilleure maîtrise de l'impact sur la qualité de l'air que dans le cas d'installations individuelles - Fournisseurs locaux sur le territoire	- Nécessite une structuration de la filière en amont pour d'importants approvisionnements - Nécessite d'intégrer les contraintes d'implantation, de disponibilité de foncier, de stockage et d'accès dès la conception - Impact sur la qualité de l'air extérieur - Type de bois et mode de stockage à définir

3.6.4 Des équipements collectifs à l'échelle du bâtiment ou de l'îlot

Chaudière biomasse collective

Le bois énergie peut également être utilisé de manière individuelle (à l'îlot) via une chaudière bois. Ces chaudières bois permettent une alimentation automatique en combustible depuis le stockage, mais cela implique d'avoir l'espace nécessaire. Le bois peut être utilisé aussi bien en granulés qu'en plaquettes forestières. Ce choix a néanmoins une incidence sur le fonctionnement : le granulé permet pour un même volume de stockage d'avoir une plus grande autonomie, mais le prix en €/kWh est légèrement supérieur. Il s'agit donc de trouver un compromis entre l'emprise dédiée, la simplicité de fonctionnement et les coûts engendrés.

Performance et impact des chaufferies collectives

L'impact plus grand des chaufferies bois inférieure à 1 MW sur la qualité doit être pris en compte. En effet, le chauffage au bois génère des polluants (particules fines, NOx, HAP, COV, ...) dont les quantités peuvent être importantes et dépendent de l'équipement utilisé, de la ressource utilisée et des conditions d'utilisation. Si les installations neuves sont aujourd'hui relativement performantes, les exigences en matière de maîtrise des émissions polluantes restent moins fortes sur les équipements ne rentrant pas dans la catégorie des ICPE. Ainsi, dans le cas de chaufferies bois inférieures à 1 MW, il sera important de veiller à la performance des équipements et à la technologie de filtration mis en place.

Pour les petites installations de chauffage biomasse, l'emploi d'appareils labellisés Flamme Verte 7 étoiles permettront de limiter les émissions de polluants et garantir la performance des équipements.

Les concentrations moyennes annuelles de fond en PM₁₀ en France en 2016.

PART DES ÉMISSIONS NATIONALES	Appareils domestiques et foyers ouverts	Chaudières collectives bois
PM ₁₀	29 %	1 %
PM _{2,5}	44 %	3 %
HAP	59 %	2 %

Figure 46 : Part des chaufferies bois et appareils individuelles dans la qualité de l'air en 2016 en France – Source : Plan Bois Energie Bretagne

Le bois énergie peut être sollicité pour satisfaire les besoins de chaleur en système collectif (échelle lot) ou en réseau de chaleur avec des contraintes foncières du fait d'une emprise à dégager pour l'implantation de la chaufferie. Le choix du bois énergie doit être intégré dès la conception des bâtiments pour que l'intégration des chaudières et éventuelle problématique du stockage soient anticipées. Un appoint est généralement nécessaire dans le cas des réseaux de chaleur et des chaufferies de logements collectifs.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Bois énergie	Bâtiment	- Recours aux énergies renouvelables - Bonne données environnementales - Ressource bon marché - Fournisseurs locaux sur le territoire	- Nécessite d'intégrer les contraintes de stockage et d'accès dès la conception dans le cas des chaudières - Type de bois et mode de stockage à définir - Impact sur la qualité de l'air extérieur - Investissement initial important

3.7 La méthanisation et la micro-méthanisation

La méthanisation est un procédé de production de chaleur ou d'électricité par dégradation de matière organique. La matière organique exploitable peut relever des déchets verts, agricoles ou industriels fermentescibles, boues de station d'épuration ou encore la part fermentescible des ordures ménagères.

Cette technique de production d'énergie se relève pertinente dans le cas d'un approvisionnement conséquent de déchets fermentescibles, en milieu agricole, ou dans le cadre d'une réflexion globale sur la stratégie de gestion des déchets.

A titre indicatif, les déchets fermentescibles d'environ **10 000 habitant-e-s**, permettent la production de 1 000 MWh de biogaz. **1 000 MWh de biogaz** représentent :

- 400 MWh d'électricité ; soit environ 13 % des besoins en électricité des constructions neuves,
- 450 MWh de chaleur, soit uniquement environ 9 % des besoins en chaleur (chauffage + ECS) des constructions neuves.

De plus, une telle installation nécessite une emprise au sol conséquente, avec :

- 1,25 m²/T de matière traitée annuellement ; soit 225 m² pour environ 180 T/an produites par 10 000 habitant-e-s,
- Auquel il faut rajouter 1 m²/T si la maturation du digestat est réalisée sur site et 1,5 m²/T pour le stockage du digestat (1 090 tonnes de digestat produits pour le traitement des déchets de 10 000 habitant-e-s).

La **petite méthanisation, ou encore micro-méthanisation**, se caractérise par une puissance installée inférieure à 80 kW. La micro-méthanisation est une technologie qui permet la valorisation des biodéchets des zones urbaines en énergie à plus petite échelle. Elle représente donc une opportunité en vue de la généralisation du compostage à tout type d'acteurs d'ici 2025.

Plusieurs entreprises se sont lancées dans le développement de cette technologie. Par exemple, l'entreprise Bee and Co concentre toutes les étapes de méthanisation

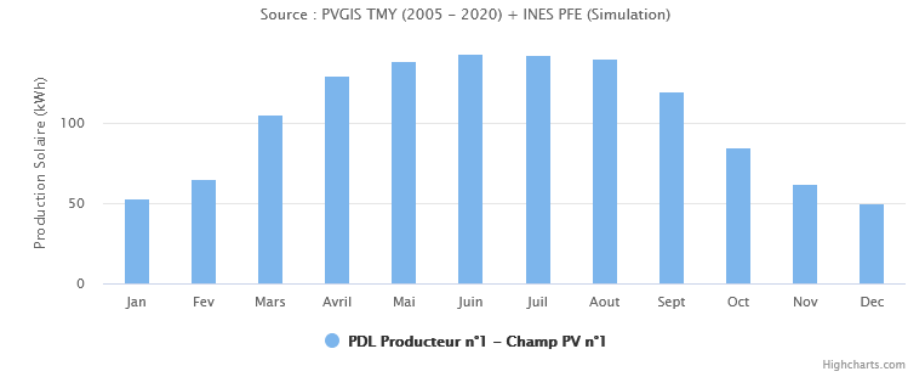
(en voie humide) et de post-traitement des coproduit dans deux containers maritimes pouvant traiter de 80 à 150 tonnes par an. Le réacteur accepte tous les biodéchets broyés y compris carnés. Il est accompagné d'une zone de stockage du biogaz en partie supérieure destiné à alimenter une chaudière ou une cogénération, mais aussi d'un module de séparation des phases du digestat avec compostage intégré par aération forcée de la partie solide, et le recyclage de la phase liquide pour la dilution des déchets entrants et/ou une ultrafiltration pour produire de l'eau claire de lavage. Ces nouvelles solutions se développent en France.

La mise en œuvre d'une solution de méthanisation peut permettre la production simultanée de chaleur et d'électricité. La nécessité de restructuration du processus de gestion des déchets à l'échelle de la commune, couplée à d'éventuelles nuisances olfactives, permettent de conclure en l'inadéquation de cette solution au contexte de l'opération. La microméthanisation ne semble pas non plus pertinente au regard des besoins et caractéristiques du projet.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Méthanisation	Quartier Commune	- Valorisation des déchets - Fonctionnement en cogénération	- Nécessite une modification de la stratégie de gestion des déchets à l'échelle territoriale - Emprise importante pour l'ensemble du process et création d'un réseau de chaleur - Non adapté au projet
Micro-méthanisation	Îlot	- Valorisation des biodéchets à plus petite échelle	- Solution innovante peu éprouvée - Non adapté au contexte

3.8 L'énergie solaire

Les données estimées par l'outil Cal-Sol de l'Institut National de l'Energie Solaire permettent d'estimer, à Saint-Herblain, le gisement solaire à 1 230 kWh/m²/an pour les zones les plus exposées (sans ombrages), les mieux inclinés (30°) et les mieux orientées (plein sud).



Irradiation sur un plan horizontal en kWh/m² par jour ☐ ou en kWh/m² cumulés ● Sources

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Globale (IGH)	30	43	96	133	170	172	181	140	92	69	35	23	1185
Directe (IBH)	10	14	46	66	87	85	95	65	37	30	12	6	553
Diffuse (IDH)	20	29	50	67	83	87	86	76	55	39	23	17	633

Irradiation sur un plan d'inclinaison 30° et d'orientation 0° avec le masque. COMPARAISONS

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Directe (IBP)	23	26	69	80	91	83	96	73	50	52	27	17	688
Diffuse (IDP)	19	27	47	63	77	81	80	71	52	36	22	16	590
Réfléchie (IRP)	0	1	1	2	2	2	2	1	1	0	0	0	16
Globale (IGP)	43	54	118	144	171	167	178	146	103	89	49	33	1294

Figure 47 : Estimation de l'irradiation sur un plan d'orientation horizontal ou d'inclinaison 30° - Outil Calsol

Le potentiel de production peut être impacté par les masques solaires, qui correspondent aux ombres enlevant de la lumière solaire et donc l'apport lumineux et calorifique. Ils sont dus à la présence d'arbres, de bâtiments ou de reliefs autour de la toiture. Quel que soit l'endroit où l'on se trouve, la façade exposée au sud ne

peut pas toujours bénéficier de soleil toute la journée. Les panneaux solaires installés sur une surface plane doivent comporter une certaine distance de séparation entre les rangées afin d’éviter le chevauchement des ombres des panneaux sur les autres.

Figure 48 : Distance de séparation des rangées de panneaux solaires

Le solaire thermique

Les capteurs solaires thermiques permettent de couvrir partiellement les besoins d’ECS des bâtiments.

En période estivale, 90% à 95% des besoins énergétiques liés à la production d’ECS peuvent être comblés par cette technique. Ce pourcentage s’avère en revanche nettement moins élevé durant l’hiver avec une production de l’ordre de 15% à 20%. Les besoins en ECS des logements étant relativement importants, il est opportun d’installer de tels systèmes sur les toitures de ce type de bâtiment.

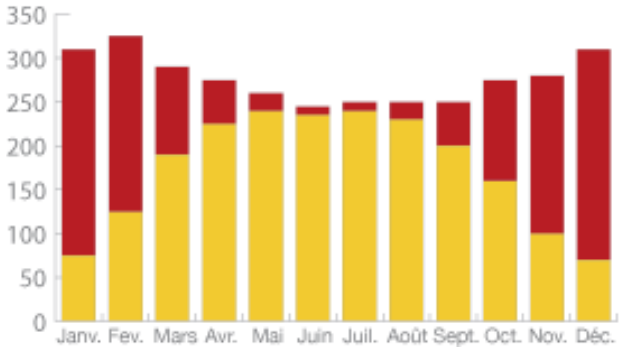
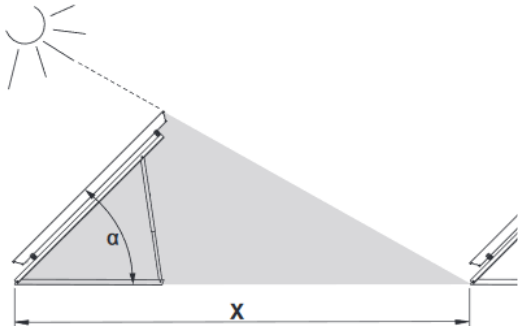


Figure 49 : Couverture type des besoins en ECS par l’énergie solaire

Le solaire thermique est pertinent pour couvrir les besoins en ECS de l’opération. Un système complémentaire doit toutefois être installé pour couvrir les besoins en chauffage.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
-----------------------	---------	--------	-------------

Solaire thermique	Bâtiment		
		- Couverture possible des besoins d'ECS des logements - Faible coût de l'énergie - Système lowtech	- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage - Impose d'avoir une production d'ECS centralisée - Diminue la densité énergétique en cas de réseau de chaleur - Peu de subvention disponible - Des dysfonctionnements parfois observés - Nécessite un travail sur l'orientation des panneaux pour optimiser le potentiel solaire

Le solaire photovoltaïque

Une installation photovoltaïque se compose de modules solaires, eux-mêmes constitués de cellules photovoltaïques, généralement conçues à base de silicium. Ces générateurs transforment directement l’énergie solaire en électricité (courant continu). La puissance des panneaux est exprimée en Watt-crête (Wc), unité qui définit la puissance électrique disponible aux bornes du générateur dans des

conditions de fonctionnement standards (ensoleillement de 1 000 W/m² et température de 25°C).

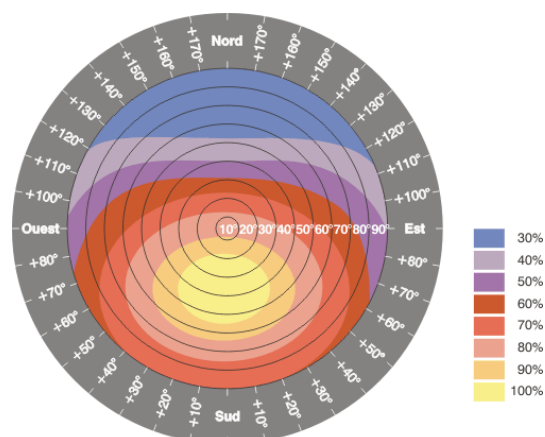


Figure 50 : Influence de l'orientation et de l'inclinaison des panneaux photovoltaïques

La production solaire peut être valorisée de trois manières :

- Revente totale pour injection sur le réseau national, qui n'est pas pertinente pour l'étude qui consiste à alimenter les besoins des bâtiments.
- Consommation de la production en autoconsommation individuelle et revente du surplus
- Consommation de la production en autoconsommation collective et revente du surplus

Autoconsommation individuelle

Pour des bâtiments collectifs, l'autoconsommation individuelle est majoritairement utilisée pour alimenter les besoins en électricité des parties communes. Elle peut également être mise en place pour les locaux individuels mais nécessite l'accorde de chaque propriétaire.

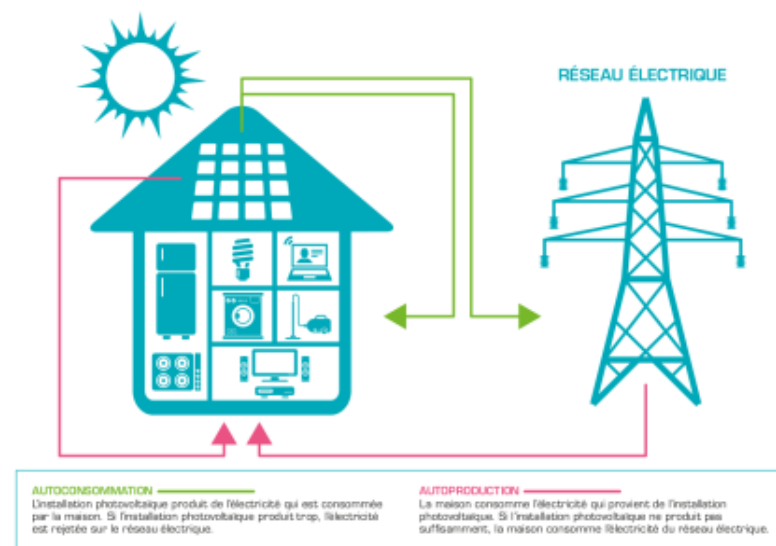


Figure 51 : Schéma de principe de l'autoconsommation individuelle

Autoconsommation collective

L'autoconsommation collective permet à plusieurs producteurs d'énergie de se regrouper au sein d'une même personne morale organisatrice (PMO). Pour cela, les points de soutirage et d'injection doivent être situés en aval d'un même poste de transformation d'électricité.

La personne morale peut être une entité juridique, une copropriété, une société (coopérative ou commerciale), une collectivité, un bailleur social, etc. La PMO aura pour rôle de gérer l'opération et sera l'interlocuteur privilégié du gestionnaire de réseau de distribution. Tous les producteurs et consommateurs seront adhérents de la PMO et une convention d'autoconsommation collective sera mise en place entre la PMO et le gestionnaire de réseau.

Des critères sont définis pour pouvoir effectuer de l'autoconsommation collective :

- Être raccordé au réseau basse tension d'un unique gestionnaire du réseau public de distribution d'électricité.

- Une distance maximum de 2 km entre les deux participants les plus éloignés (dérogation possible en zone rurale, en cas d'isolement du lieu, d'habitat dispersé et de faible densité de population).
- La puissance cumulée des installations doit être inférieure à 3 MWc sur le territoire métropolitain continental et 0,5 MWc dans les zones non interconnectées. La puissance considérée pour l'énergie solaire est le MWc.

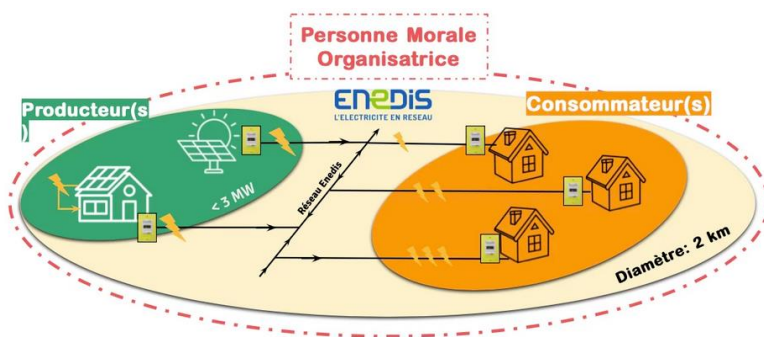


Figure 52 : Schéma de principe de l'autoconsommation collective

Le solaire photovoltaïque est pertinent avec les besoins en électricité de l'opération.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Solaire photovoltaïque	Bâtiment	- Indépendant des besoins énergétiques (souplesse de déploiement) - Production locale d'électricité renouvelable - Possibilité d'autoconsommation	- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage - Investissement et montage juridique à prévoir - Autoconsommation difficile pour les bâtiments d'habitations - Nécessite un travail sur l'orientation et l'implantation des panneaux pour

			optimiser le potentiel solaire
--	--	--	--------------------------------

Le solaire hybride

Le solaire hybride relève de l'association de deux technologies solaires : photovoltaïque et thermique, en un seul panneau capable de produire simultanément du chaud et de l'électricité.

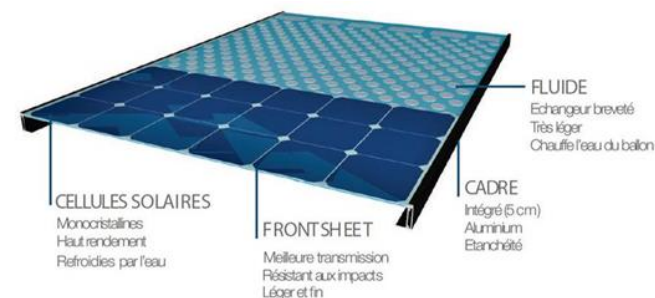


Figure 53 : Schéma de principe du solaire hybride - DualSun

En revanche, la production solaire thermique n'est pas optimisée par rapport à un capteur solaire thermique traditionnel de même taille. Le rayonnement solaire n'est pas direct sur le fluide caloporteur en sous couche. Le fluide caloporteur récupère les déperditions (chaleur) des modules photovoltaïques par convection et conduction.

Ce système est plutôt adapté aux logements, car il permet de couvrir une partie des besoins d'ECS (qu'il est impossible de réduire en phase conception) et une partie des besoins électriques (qui sont très importants).

La production d'énergie solaire par capteurs solaires hybrides est pertinente étant donné la programmation essentiellement composée de logements.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Solaire hybride	Bâtiment	- Couverture d'une partie des besoins d'ECS et production locale d'électricité renouvelable - Possibilité d'autoconsommation - Possibilité d'autoconsommation	- Impose une production centralisée - Diminue la densité énergétique en cas de réseau de chaleur - Autoconsommation difficile pour les bâtiments d'habitations - Nécessite un travail sur l'orientation et l'implantation des panneaux pour optimiser le potentiel solaire

3.9 L'éolien

Les différents dispositifs d'éoliennes permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, transformée alors en électricité grâce à une génératrice.

3.9.1 Le grand et moyen éolien

D'après l'ancien Schéma Régional Eolien de Bretagne, et de la cartographie mis à disposition par la DREAL, la commune de Bruz ne se situe pas dans une zone favorable au développement de l'éolien.

Les secteurs étant situés dans ou proche de la ville, le projet se trouve sur une zone défavorable, multipliant les contraintes et servitudes pour l'implantation d'éoliennes (moins de 500m d'habitations, en zone d'interdiction d'implantation de l'éolien).

La réglementation ne permet pas d'implanter des éoliennes sur le projet compte tenue de la proximité des habitations.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Eolien	Quartier	- Production locale d'électricité	- Site non adapté : zone d'interdiction de développement de l'éolien - Investissement difficilement rentabilisé

3.9.2 Le petit éolien : les éoliennes de bâtiment

Le petit éolien n'a, pour l'heure, pas démontré de productivité et de fiabilité intéressante : hauteur du mat et surface productive, rentabilité, production, fragilité. Les machines existantes vont de quelques kW à quelques centaines de kW. Elles

subissent une très grande variabilité des vents (turbulences générées par les bâtiments) et peuvent par ailleurs transmettre des vibrations au bâti.

L'utilisation d'éoliennes de bâtiment n'est pas pertinente pour la stratégie énergétique.

Ressource énergétique	Echelle	Atouts	Contraintes
Petit éolien	Bâtiment	- Production locale d'électricité - Bâtiment de grande hauteur	- Faible potentiel, à évaluer en fonction des corridors de vent créés par la disposition des bâtiments - Investissement difficilement rentabilisé - Nuisances sonores / vibrations

4. BILAN ATOUTS-CONTRAINTES

Technologie / Ressource	Echelle	Besoins	Pertinence	Avantages	Inconvénients
Raccordement à un réseau de chaleur existant	Quartier Commune	Chauffage ECS	Forte	- Mutualisation de l'approvisionnement énergétique - Approvisionnement vertueux - Présence d'un réseau à proximité	- Temporalité de raccordement
Création d'un réseau de chaleur	Quartier	Chauffage ECS	Faible	- Mutualisation de l'approvisionnement énergétique - Approvisionnement vertueux - Maîtrise des systèmes énergétiques et des charges pour les futurs habitants - Réduction de la dépendance aux énergies fossiles si réseau vertueux - Potentielle subvention de l'ADEME	- Phasage du projet - Coût d'investissement pour la création du réseau - Nécessité de dégager une emprise pour l'unité de production énergétique
Géothermie basse énergie (sur aquifère profond)	Quartier / commune	Chauffage ECS	Nulle	- Production de chaud et de froid en géocooling - Très bon rendement	- Manque de ressource géothermique - Coûts d'investissements élevés
Géothermie superficielle/très basse énergie sur nappe	Bâtiment Îlot	Chauffage Froid ECS	Nulle	- Production de chaud et de froid en géocooling - Très bon rendement	- Nécessite la réalisation d'un forage test pour valider la ressource disponible - Nécessite un appoint de production de chaleur pour couvrir l'ensemble des besoins
Géothermie sur champ de sondes	Quartier Bâtiment	Chauffage Froid ECS	Forte	- Une solution de sondes verticales est plus adaptée à un projet de logements collectifs que des sondes horizontales - Production de chaud et de froid en géocooling - Très bon rendement	- Risque d'interférence entre les installations en cas de multiplication des ouvrages - Nombre de sondes proportionnelle à la puissance - Foncier nécessaire pour le système horizontal
Boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG) Boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG) Boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG)	Quartier Îlot	Chauffage Froid ECS	Moyenne	- Performances énergétique, économique et environnementale - Adaptabilité des besoins - Multiplication des sources d'énergies possibles	- Nécessite un appoint si besoin de haute température - Meilleure efficacité avec une mixité programmatique

Technologie / Ressource	Echelle	Besoins	Pertinence	Avantages	Inconvénients
Aérothermie	Bâtiment	Chauffage / froid ECS	Forte	- Utilisation des calories présentes dans l'air - Faible consommation d'énergie électrique - Pas d'émissions directes de polluant atmosphériques	- Rendement moins élevé que la géothermie - Rendement diminué lorsque les températures extérieures sont trop basses - Systèmes techniques à placer en extérieur
Récupération d'énergie sur eaux grises	Bâtiment	ECS	Forte	- Système passif et simple d'entretien - A minima 20% de réduction des consommations nécessaires pour couvrir les besoins en ECS (préchauffage)	- Nécessite 2 réseaux (séparation des réseaux eaux vannes et eaux grises) - Diminue la densité énergétique en cas de raccordement complémentaire à un réseau de chaleur - Système complémentaire nécessaire
Récupération d'énergie sur eaux usées (STEP)	Quartier	Chauffage ECS	Nulle	- Récupération d'énergie fatale	- Solution ne pouvant être mise en place en cas d'absence d'un réseau et débits adaptés - Echangeur intégré aux réseaux : solution complexe à mettre en œuvre - Nécessité de vérifier la possibilité de la mise en place de ce système vis-à-vis de la STEP
Récupération d'énergie sur groupe froid	Îlot	ECS	Nulle	- Synergie entre groupe froid et production d'ECS - Amélioration du rendement des groupes froid - Préchauffage de l'ECS - Système passif et simple d'entretien	- Proximité immédiate des besoins de froid et d'ECS - Couverture des besoins dépendants des besoins en froid des activités
Récupération d'énergie sur datacenter	Îlot	ECS	Nulle	- A minima 20% de réduction des consommations nécessaires pour couvrir les besoins en ECS (préchauffage)	- Absence de datacenter à proximité du projet
Chaudière numérique	Îlot	ECS	Nulle	- 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 - Couverture des besoins dépendants des besoins en froid des activités - Non applicable à la programmation du projet
Bois énergie	Îlot Quartier	Chauffage ECS	Nulle	- Possibilité de massifier le taux d'énergies renouvelables - Données environnementales bonnes - Meilleure maîtrise de l'impact sur la qualité de l'air que dans le cas d'installations individuelles	- Nécessite une structuration de la filière en amont pour d'importants approvisionnements - Nécessite d'intégrer les contraintes d'implantation, de disponibilité de foncier, de stockage et d'accès dès la conception

Technologie / Ressource	Echelle	Besoins	Pertinence	Avantages	Inconvénients
	Bâtiment	Chauffage ECS	Nulle	- Fournisseurs locaux sur le territoire	- Impact sur la qualité de l'air extérieur
				- Recours aux énergies renouvelables	- Nécessite d'intégrer les contraintes de stockage et d'accès dès la conception dans le cas des chaudières
				- Bonne données environnementales	- Type de bois et mode de stockage à définir
				- Ressource bon marché	- Impact sur la qualité de l'air extérieur
				- Fournisseurs locaux sur le territoire	- Investissement initial important
Méthanisation	Quartier	Chauffage	Nulle	- Valorisation des déchets	- Nécessite une modification de la stratégie de gestion des déchets à l'échelle territoriale
	Commune			- Fonctionnement en	- Emprise importante pour l'ensemble du process et création d'un réseau de chaleur
		ECS			- Non adapté au projet
Micro-méthanisation	Îlot	Chauffage	Nulle	-Valorisation des biodéchets à plus petite échelle	-Solution innovante peu éprouvée
		ECS			- Non adapté au contexte
Solaire thermique	Bâtiment	ECS	Moyenne		- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage
					-Impose d'avoir une production d'ECS centralisée
				- Couverture possible des besoins d'ECS des logements	- Diminue la densité énergétique en cas de réseau de chaleur
				- Faible coût de l'énergie	- Peu de subvention disponible
				- Système lowtech	- Des dysfonctionnements parfois observés
					- Nécessite un travail sur l'orientation des panneaux pour optimiser le potentiel solaire

Technologie / Ressource	Echelle	Besoins	Pertinence	Avantages	Inconvénients
Solaire photovoltaïque	Bâtiment	Electricité	Forte	- Indépendant des besoins énergétiques (souplesse de déploiement) - Production locale d'électricité renouvelable - Possibilité d'autoconsommation	- Utilisation des toitures pour l'énergie : éventuel conflit d'usage - Investissement et montage juridique à prévoir - Autoconsommation difficile pour les bâtiments d'habitations - Nécessite un travail sur l'orientation et l'implantation des panneaux pour optimiser le potentiel solaire
Solaire hybride	Bâtiment	ECS Electricité	Forte	- Couverture d'une partie des besoins d'ECS et production locale d'électricité renouvelable - Possibilité d'autoconsommation - Possibilité d'autoconsommation	- Impose une production centralisée - Diminue la densité énergétique en cas de réseau de chaleur - Autoconsommation difficile pour les bâtiments d'habitations - Nécessite un travail sur l'orientation et l'implantation des panneaux pour optimiser le potentiel solaire
Eolien	Quartier	Electricité	Nulle	- Production locale d'électricité	- Site non adapté : zone d'interdiction de développement de l'éolien - Investissement difficilement rentabilisé
Petit éolien	Bâtiment	Electricité	Nulle	- Production locale d'électricité - Bâtiment de grande hauteur	- Faible potentiel, à évaluer en fonction des corridors de vent créés par la disposition des bâtiments - Investissement difficilement rentabilisé - Nuisances sonores / vibrations

5. STRATEGIE ENERGETIQUE

5.1 Hypothèses

L'alimentation des besoins thermiques est étudiée indépendamment des besoins électriques.

La programmation étant uniquement composée de logements, les besoins en froid du périmètre d'étude sont nuls.

5.2 Variation du niveau de besoins thermiques

La RE2020 impose de concevoir des bâtiments respectant un niveau de besoin à ne pas dépasser, le Bbio_max. Le niveau à atteindre tient compte de la surface du bâtiment, de sa localisation géographique ...

La réduction des besoins est réalisable en actionnant les leviers suivants :

- Augmentation de la compacité
- Optimisation des apports solaires
- Augmentation de l'isolation et de l'inertie du bâtiment
- Réduction des ponts thermiques, par exemple en mettant en place des balcons désolidarisés de la façade

Pour le périmètre d'étude, une réduction des besoins de 10% est étudiée.

5.3 Volet thermique

5.3.1 Scénario 1 - Référence

Pour le scénario de référence, chacun des 10 bâtiments du périmètre d'étude est équipés d'une PAC air/eau collective avec appoint gaz. Les PAC alimentent les besoins en chauffage et en ECS des bâtiments.

Système énergétique	Chaud	ECS	Froid
Logements	PAC air/eau appoint gaz		-
Bureaux	PAC air/eau appoint gaz		-
Hôtels	PAC air/eau réversible appoint gaz		
Commerces	PAC air/eau réversible appoint gaz		

5.3.2 Scénario 1 bis – Diminution des besoins

Ce scénario est identique au scénario de référence, excepté que les besoins sont diminués de 10% par rapport à l'indicateur Bbio de la RE2020 qui représente l'efficacité énergétique du bâti.

Système énergétique	Chaud	ECS	Froid
Logements	PAC air/eau appoint gaz		-
Bureaux	PAC air/eau appoint gaz		-
Hôtels	PAC air/eau réversible appoint gaz		
Commerces	PAC air/eau réversible appoint gaz		

5.3.3 Scénario 2 – Raccordement RCU

Pour le second scénario, les différents bâtiments sont raccordés au RCU afin de fournir les besoins en chaud et ECS.

Système énergétique	Chaud	ECS	Froid
Logements	RCU		-
Bureaux	RCU		-

Hôtels	RCU	PAC air/eau froid
Commerces	RCU	PAC air/eau froid

5.3.4 Scénario 3 – Géothermie sur champs de sondes

Le troisième scénario étudié s'appuie sur le scénario de référence avec la mise en place de PAC air/eau collectives par bâtiment. Pour les besoins en froid des commerces, des sondes géothermiques sont installées, elles seront également utilisées en énergie d'appoint pour les besoins en chaud et en ECS. L'installation de sondes géothermiques étant consommatrice en espace, les lots présentant des besoins important en froid (A1, A2 et I) seront équipés de PAC air/eau froid. Le bâtiment D étant situé au niveau de la station essence de la galerie commerciale, il sera également équipé d'une PAC afin d'éviter la propagation des polluants des sols.

Système énergétique	Chaud	ECS	Froid
Logements	PAC air/eau appoint gaz		-
Bureaux	PAC air/eau appoint gaz		-
Hôtels	PAC air/eau réversible appoint gaz		
Commerces lots A1, A2, D, et I	PAC air/eau réversible appoint gaz		
Commerces lots B, C, F et G	80 % PAC air/eau appoint gaz 20 % PAC géothermique sur champs de sondes		PAC géothermique sur champs de sondes

Afin de fournir le froid pour les bâtiments B, C, F et G, 63 sondes devront être installées, soit une surface de 6300 m².

5.3.5 Scénario 4 – Récupération de chaleur sur eaux grises

Un quatrième scénario est étudié visant à réduire les consommations énergétiques pour la production d'eau chaude sanitaire. Pour cela, un système collectif de récupération de chaleur sur les eaux grises est installé au sein de chaque bâtiment.

En complément, une PAC air/eau est installée pour rehausser la température de l'ECS préchauffée et pour alimenter les besoins en chauffage.

Système énergétique	Chaud	ECS	Froid
Logements	PAC air/eau appoint gaz	80% PAC air/eau appoint gaz 20% Récupération de chaleur sur eaux grises	-
Bureaux	PAC air/eau appoint gaz		-
Hôtels	PAC air/eau réversible appoint gaz		
Commerces	PAC air/eau réversible appoint gaz		

5.4 Volet électrique

Des variantes de solarisation sont étudiées. Dans un premier temps, le plan masse a été analysé pour déterminer les surfaces de toitures les plus pertinentes pour la solarisation au regard des ombres portées, des covisibilités et des usages souhaités (végétalisation, toiture terrasses, etc...).

Les toitures retenues sont les toitures hautes de chacun des bâtiments comme illustré en jaune sur la figure ci-après.



Figure 54 : Identification des toitures solarisables (plan masse d'octobre 2025)

5.4.1 Scénario 1 -Référence

Le scénario de référence consiste à alimenter 100% des besoins électriques de l'opération par le réseau électrique national.

Plusieurs variantes de solarisation sont ensuite établies pour étudier l'impact environnemental et économique de différents paramètres.

5.4.2 Scénario 2 – 50% de toitures solarisée en ACC

Dans ce scénario, les toitures solarisables (en orange sur la Figure 54) sont solarisées à 50%. L'hypothèse est prise que toutes les toitures sont plates,

permettant d'installer l'ensemble des panneaux en orientation Sud. La production solaire est valorisée via une boucle d'autoconsommation collective.

5.4.3 Scénario 3 – 50% de toitures solarisée en ACI

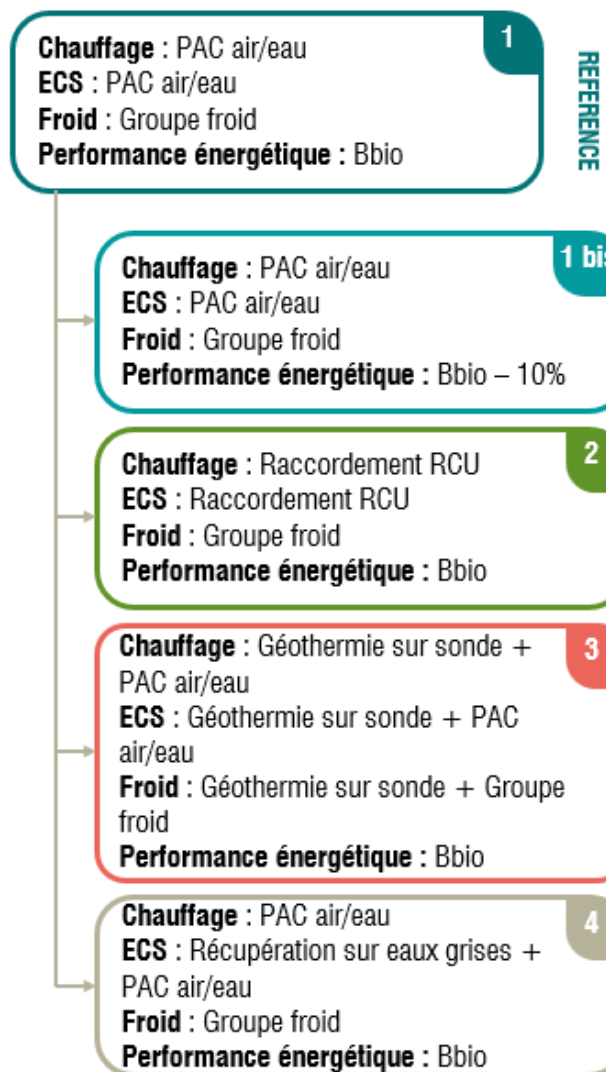
Dans ce scénario, les toitures solarisables (en orange sur la Figure 54) sont solarisées à 50%. L'hypothèse est prise que toutes les toitures sont plates, permettant d'installer l'ensemble des panneaux en orientation Sud. La production solaire est valorisée via une boucle d'autoconsommation individuelle.

5.4.4 Scénario 4 – 100% de toitures solarisée en ACC

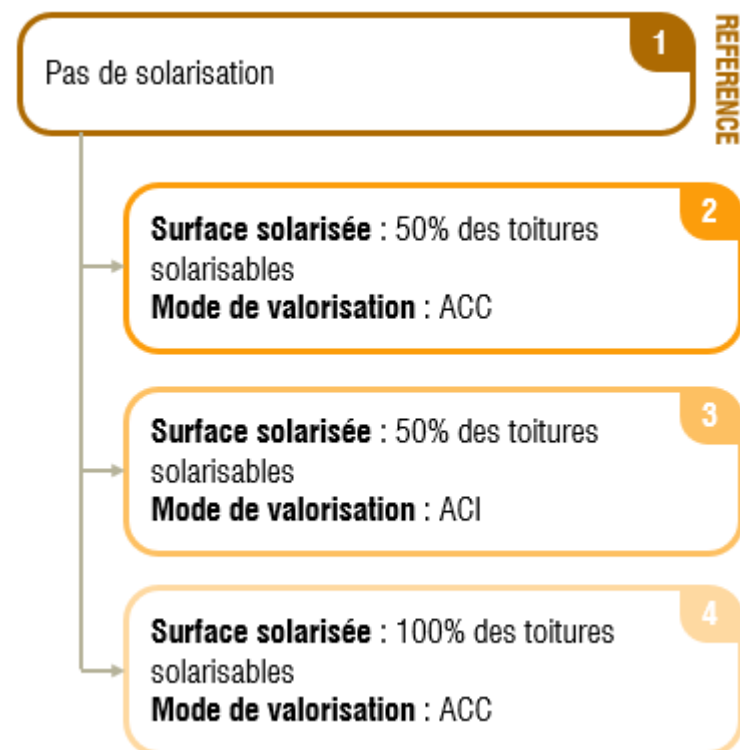
Dans ce scénario, les toitures solarisables (en orange sur la Figure 54) sont solarisées à 100%. L'hypothèse est prise que toutes les toitures sont plates, permettant d'installer l'ensemble des panneaux en orientation Sud. La production solaire est valorisée via une boucle d'autoconsommation collective.

5.5 Synthèse des scénarios

5.5.1 Scénarios thermiques



5.5.2 Scénario électriques



6. ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE DES SCENARIOS

6.1 Hypothèses

Le tableau ci-dessous expose les données environnementales utilisées pour le réseau électrique national :

Taux d'EnR (%)	25%
Emissions de CO2 (gCO2/kWh)	57

6.2 Description des indicateurs environnementaux

6.2.1 Volet thermique

Les indicateurs environnementaux utilisés dans le cadre de l'étude sont les suivants :

- Consommation d'énergie finale
- Taux d'EnR&R (%)
- Emission de CO2

6.2.2 Volet électrique

Les indicateurs environnementaux utilisés dans le cadre de l'étude sont les suivants :

- Production photovoltaïque (MWh/an)
- Autoconsommation (%) : part de la production solaire consommée in situ
- Autoproduction (%) : part des besoins électriques des bâtiments du projet alimentés par la production photovoltaïque
- Taux d'EnR&R (%)
- Emissions des CO2 évitées par rapport à l'électricité du réseau national (tCO2eq/an)

6.3 Description des indicateurs économiques

6.3.1 Volet thermique

Les indicateurs économiques utilisés dans le cadre de l'étude sont les suivants :

- Investissement (k€)
- Coût de la chaleur (k€/an) : coût payé par l'utilisateur pour l'approvisionnement en énergie, ainsi que l'entretien et la maintenance des systèmes énergétiques.

6.3.2 Volet électrique

Les indicateurs économiques utilisés dans le cadre de l'étude sont les suivants :

- Investissement (k€)
- Subventions (k€)
- Pour le producteur : Ventes annuelles de l'excédent de production (€/an)
- Pour le producteur : Ventes annuelles aux consommateurs (€/an)
- Pour les consommateurs : Economies de facture (€/an)
- Temps de retour sur actualisé (an) : nombre d'années nécessaires avant que le projet soit rentable
- Taux de rentabilité interne : risque maximum à prendre en compte pour que le projet soit rentable

6.4 Analyse des scénarios thermiques

Les scénarios thermiques sont analysés en comparaison avec le scénario de référence.

6.4.1 Scénario 1 – Référence

Indicateurs	Chaud	Froid
Indicateurs environnementaux		
Consommation EF (MWh/an)	2 995	648
% EnR&R	71%	48%
Emissions de CO2 (tCO2eq/an)	452	37
Indicateurs économiques		
Cout de la chaleur (€TTC/log/an)	222	188
Investissement (k€TTC)	795	767

Ce scénario a été défini comme le scénario de référence : il a pour avantage de constituer une solution techniquement simple et économiquement accessible. Son investissement initial modéré en fait une option économiquement avantageuse à court terme, mais il s'accompagne de coûts d'exploitation et de maintenance élevés ainsi que d'une forte dépendance aux fluctuations du prix du gaz et de l'électricité, pouvant entraîner à long terme une hausse significative de la facture énergétique.

Une part d'énergies renouvelables est tout de même intégrée à ce scénario, issue des pompes à chaleur installées et du mix électrique français, globalement décarboné grâce à la prédominance du nucléaire. Toutefois, le bilan environnemental global reste peu satisfaisant, avec des émissions de gaz à effet de serre élevées et une dépendance persistante aux énergies fossiles.

6.4.2 Scénario 1 bis – Diminution des besoins

Indicateurs	Chaud	Froid
Indicateurs environnementaux		
Consommation EF (MWh/an)	2 284	584
% EnR&R	71%	48%
Emissions de CO2 (tCO2eq/an)	345	33
Indicateurs économiques		
Cout de la chaleur (€TTC/log/an)	174	170
Investissement (k€TTC)	759	701

Ce scénario, qui repose sur les mêmes systèmes techniques que le scénario de référence, se distingue par une réduction des consommations énergétiques. Bien que les taux d'intégration des énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) soient identiques à ceux du scénario de référence, la baisse de la demande permet une réduction significative des émissions de CO2, avec une diminution de 22% pour le chauffage et de 11% pour le refroidissement.

D'un point de vue économique, les investissements nécessaires ainsi que le coût de la chaleur subissent une baisse dans ce scénario, ce qui en fait une option plus favorable tant sur le plan financier qu'environnemental. Cette réduction des coûts et des émissions renforce l'attrait de ce scénario comme solution plus durable et plus rentable à long terme.

6.4.3 Scénario 2 – Raccordement RCU

Indicateurs	Chaud	Froid
Indicateurs environnementaux		
Consommation EF (MWh/an)	5 530	486
% EnR&R	94%	61%
Emissions de CO2 (tCO2eq/an)	674	28
Indicateurs économiques		
Coût de la chaleur (€TTC/log/an)	109	107
Investissement (k€TTC)	2 797	798

Le raccordement au RCU Nantes Nord Chézine entraîne une augmentation de la consommation d'énergie finale ainsi qu'une hausse des émissions de carbone pour la production de chaleur, par rapport au scénario de référence. Cela s'explique par l'efficacité thermique PAC, qui est généralement plus élevée que celle des systèmes du RCU, ainsi que par la part importante de gaz (26%) utilisée pour alimenter ce dernier.

En revanche, ces deux indicateurs (consommation et émissions) sont meilleurs pour la production de froid dans ce scénario, car le système repose sur des PAC air/eau froid, qui sont plus performantes et moins polluantes que les PAC réversibles fonctionnant au gaz utilisées dans le scénario de référence.

L'utilisation du RCU permet également d'atteindre un taux de recours aux énergies renouvelables bien supérieur à celui du scénario de référence, tant pour le chauffage que pour le refroidissement. Ce système, existant et mutualisé, est également une priorité dans la démarche EnR choix, en raison de son efficacité et de sa flexibilité.

Le raccordement au RCU seul a donc un intérêt environnemental limité, un couplage avec un autre scénario permettrait de limiter la consommation d'énergie finale et les émissions carbone et ainsi d'obtenir un profil environnemental plus favorable.

D'un point de vue économique, bien que l'investissement pour le raccordement au RCU soit significativement plus élevé que dans le scénario de référence, le coût de la chaleur est considérablement réduit, permettant ainsi un retour sur investissement plus rapide, avec un temps de retour estimé à 8 ans. Ce compromis entre investissement initial et économies sur le long terme fait de ce scénario une option intéressante sur le plan économique, en plus de ses avantages environnementaux.

6.4.4 Scénario 3 – Géothermie sur champs de sondes

Indicateurs	Chaud	Froid
Indicateurs environnementaux		
Consommation EF (MWh/an)	2 798	531
% EnR&R	72%	58%
Emissions de CO2 (tCO2eq/an)	414	30
Indicateurs économiques		

Cout de la chaleur (€TTC/log/an)	203	153
Investissement (k€TTC)	755	4 749

La géothermie sur sonde, utilisée uniquement en tant qu'énergie d'appoint pour la production de chaleur, apporte des bénéfices limités en termes d'indicateurs environnementaux par rapport au scénario de référence. En effet, malgré son efficacité pour le chauffage, elle entraîne une légère augmentation de la consommation d'énergie finale en raison de l'efficacité énergétique des pompes à chaleur géothermiques.

En revanche, pour la production de froid, les avantages sont plus significatifs. On observe une réduction de la consommation d'énergie finale de 18%, une hausse du taux d'EnR de 10%, et une diminution des émissions de CO2 de 19%. Cependant, ces gains restent modérés, car les besoins en froid sont 2,5 fois moins importants que ceux en chaleur, ce qui limite l'impact global de cette solution pour le projet.

Concernant les indicateurs économiques, les résultats pour la production de chaleur sont proches de ceux du scénario de référence. En revanche, pour la production de froid, l'investissement initial est nettement plus élevé. Toutefois, grâce à une réduction du coût de la chaleur, le temps de retour sur investissement est estimé à 34 ans. Bien que cela réduise les coûts de fonctionnement sur le long terme, le temps de retour élevé fait de cette solution un choix moins pertinent d'un point de vue économique.

6.4.5 Scénario 4 – Récupération de chaleur sur ECS

Indicateurs	Chaud	Froid
Indicateurs environnementaux		
Consommation EF (MWh/an)	3 170	648
% EnR&R	73%	48%
Emissions de CO2 (tCO2eq/an)	418	37
Indicateurs économiques		
Cout de la chaleur (€TTC/log/an)	227	188
Investissement (k€TTC)	687	767

Ce scénario entraîne une augmentation de la consommation d'énergie finale pour la production de chaleur, due à l'efficacité inférieure des systèmes de récupération de chaleur sur eaux grises par rapport aux PAC. Toutefois, il permet d'augmenter le taux d'EnR de 2% et de réduire les émissions de CO2 de 8%.

D'un point de vue économique, ce dispositif réduit l'investissement initial de 14%, bien qu'il génère une légère augmentation de 2% du coût de la chaleur. Néanmoins, l'utilisation de la récupération de chaleur sur eaux grises présente un avantage stratégique en limitant la dépendance au gaz et au réseau électrique français, ce qui permet de mieux maîtriser les fluctuations du coût de la chaleur qui pourraient augmenter à l'avenir.

Concernant la production de froid, ce scénario est identique à celui de référence, et ses indicateurs environnementaux et économiques sont donc identiques.

6.5 Analyse des scénarios électriques

6.5.1 Résultats bruts

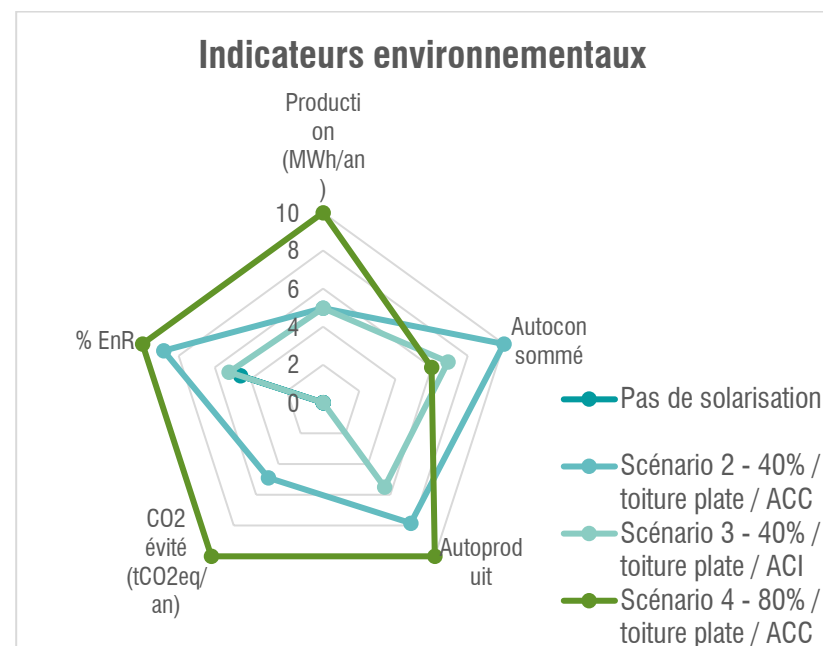
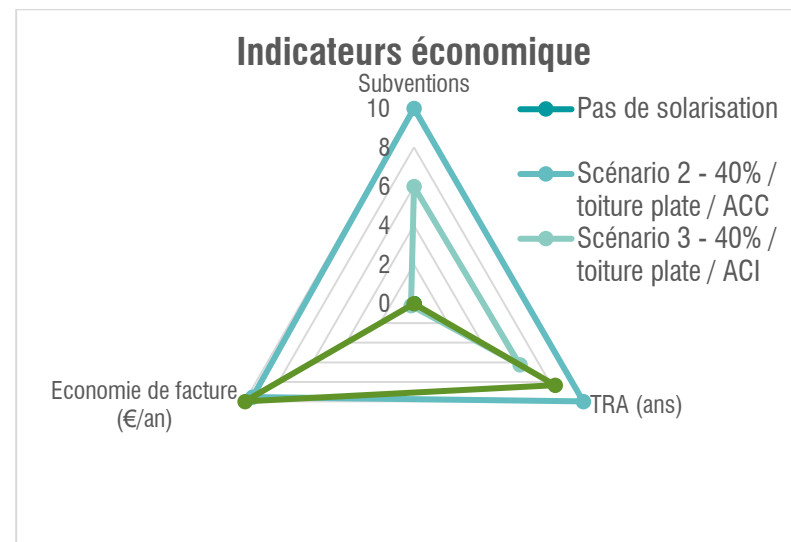
Indicateurs environnementaux

Scénario	MWh/an	%	%	%
	Production totale	Autoproduction	Part d'EnR	Autoconsommation
1 - Pas de solarisation	0	0%	25%	-
2 - PV 50% - ACC	1166	31%	48,2%	78%
3 - PV 50% -ACI	1166	22%	28,4%	57%
4 - PV 100% - ACC	2343	39%	54,6%	50%

Indicateurs économiques

Scénario	k€	k€/an	an
	Investissement	Gains revente	TRA
1 - Pas de solarisation	0	0	0
2 - PV 50% - ACC	865	980	5
3 - PV 50% -ACI	984	1 724	8
4 - PV 100% - ACC	1 566	3 897	6

Les graphiques radars présentés dans les parties suivantes présentent les différents indicateurs sur une échelle de 1 à 10, 10 étant le score obtenu par le scénario le plus favorable pour l'indicateur étudié. Les scores des autres scénarios sont calculés proportionnellement à l'indicateur le plus élevé. Plus un scénario a des indicateurs proches de 10, plus son profil environnemental ou économique est favorable.



6.5.2 Scénario 1 – Référence : pas de solarisation

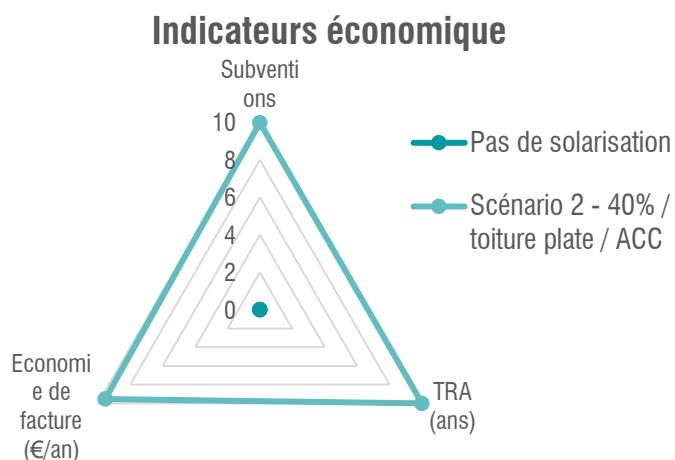
Le scénario de référence est plus simple et économique dans la mise en œuvre puisqu'un simple raccordement au réseau électrique national suffit.

6.5.3 Scénario 2

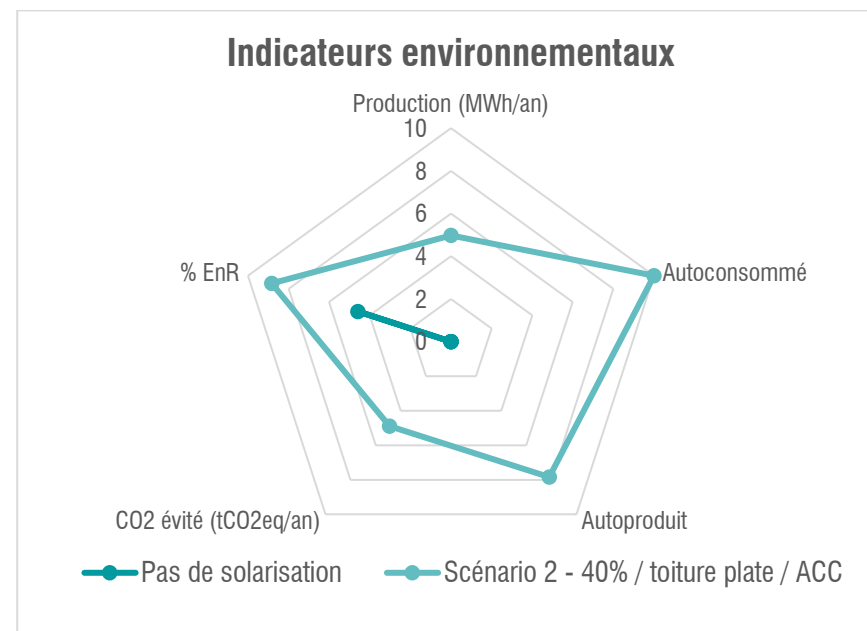
La solarisation d'une partie des toitures du périmètres d'étude permet de produire localement des EnR pour alimenter les besoins énergétiques de l'opération.

Cela permet de contribuer aux objectifs de Nantes Métropole d'augmentation de la production d'EnR sur son territoire. De plus, l'excédent de production ne pouvant pas être consommé peut être revendu à Enedis et être injecté sur le réseau national, contribuant ainsi au verdissement du réseau national.

En revanche, la solarisation demande un investissement pouvant être porté par un tiers-investisseur ou par les promoteurs. Cela induit également de s'engager dans un montage juridique pour gérer la mise à disposition des toitures, la gestion contractuelle entre les producteurs et les consommateurs, etc... Dans le cas de l'autoconsommation collective, si l'investissement est réalisé d'un seul tenant par un tiers-investisseur, cela permet de réaliser des économies d'échelle.

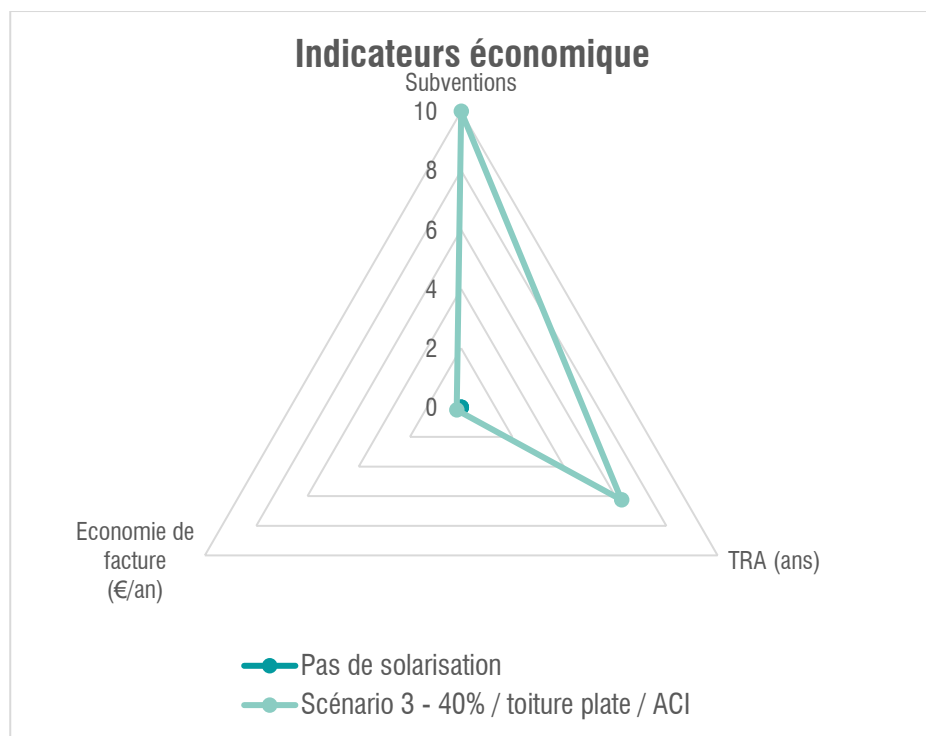


Ce scénario nécessite l'investissement initial le plus faible parmi les options envisagées. De plus, des subventions sont disponibles pour alléger cet investissement. Un équilibre économique favorable est atteint grâce à la combinaison des revenus générés par la vente d'électricité aux consommateurs du site d'étude et la vente de l'excédent au gestionnaire du réseau électrique.

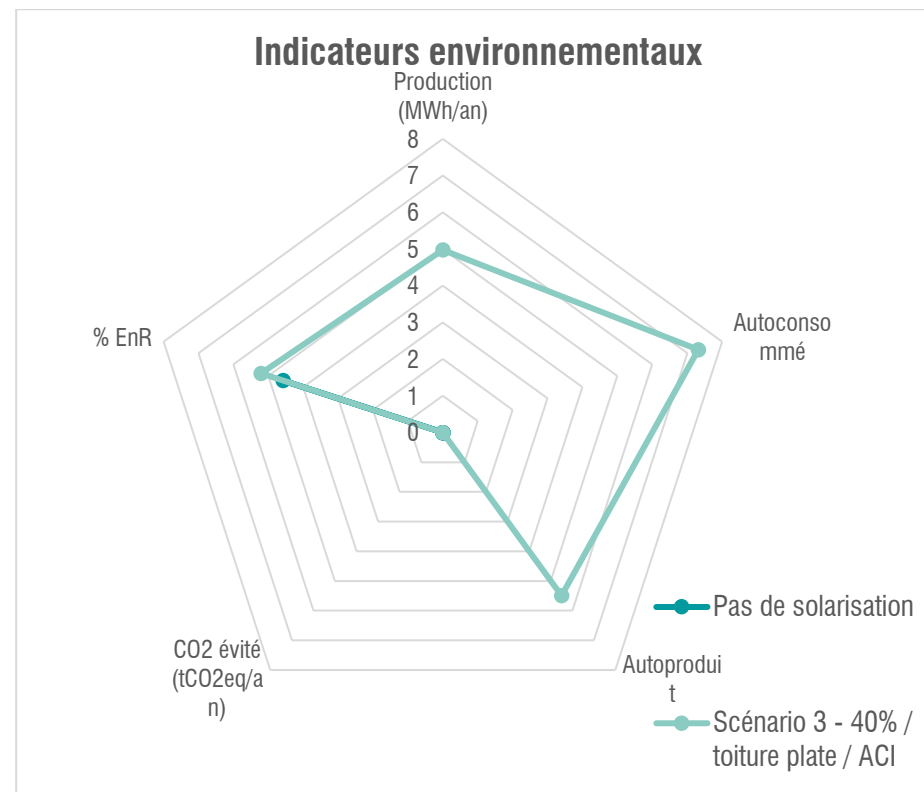


Sur le plan environnemental, ce scénario présente un profil globalement avantageux. Il se distingue par un taux d'autoconsommation et d'autoproduction élevé, ainsi qu'un pourcentage important d'énergies renouvelables (EnR). De plus, il permet de réduire les émissions de carbone par rapport au scénario de référence, renforçant ainsi sa pertinence dans une démarche de durabilité.

6.5.4 Scénario 3



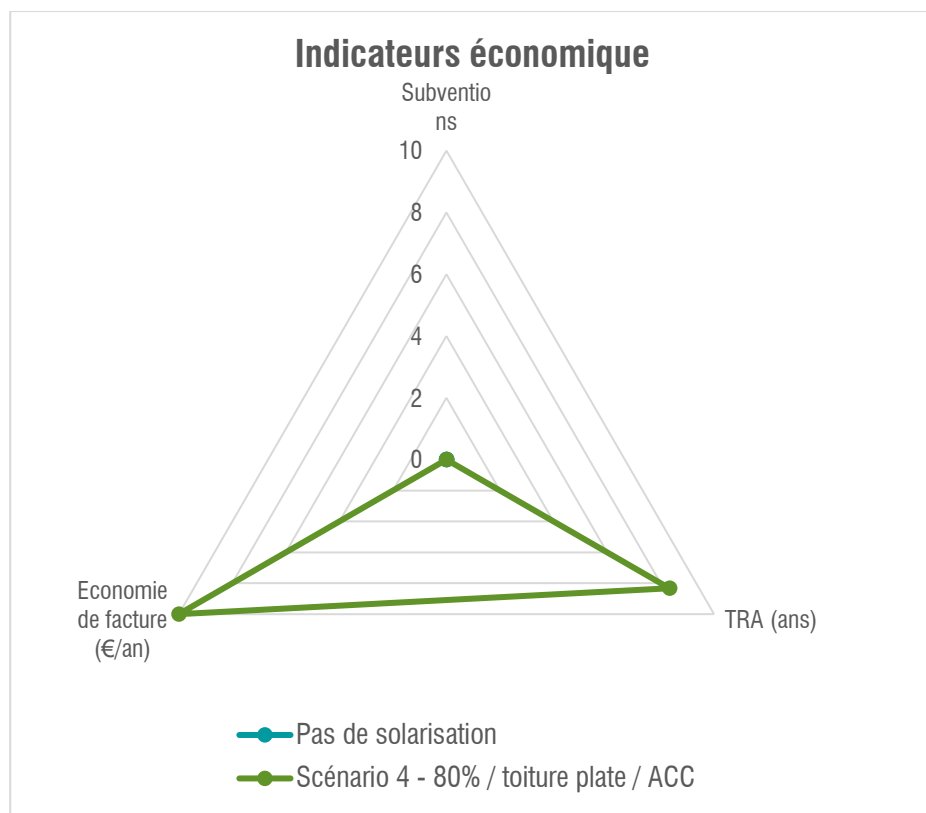
Ce scénario nécessite un investissement légèrement supérieur à celui du scénario 2, bien qu'il donne également accès à des subventions. Toutefois, l'économie réalisée sur la facture d'électricité est relativement faible par rapport au scénario précédent, et le temps de retour actualisé est plus long. De plus, dans le cadre de l'autoconsommation individuelle, il est fréquent que l'électricité produite serve uniquement à alimenter les besoins des parties communes des immeubles, limitant ainsi l'impact des économies.



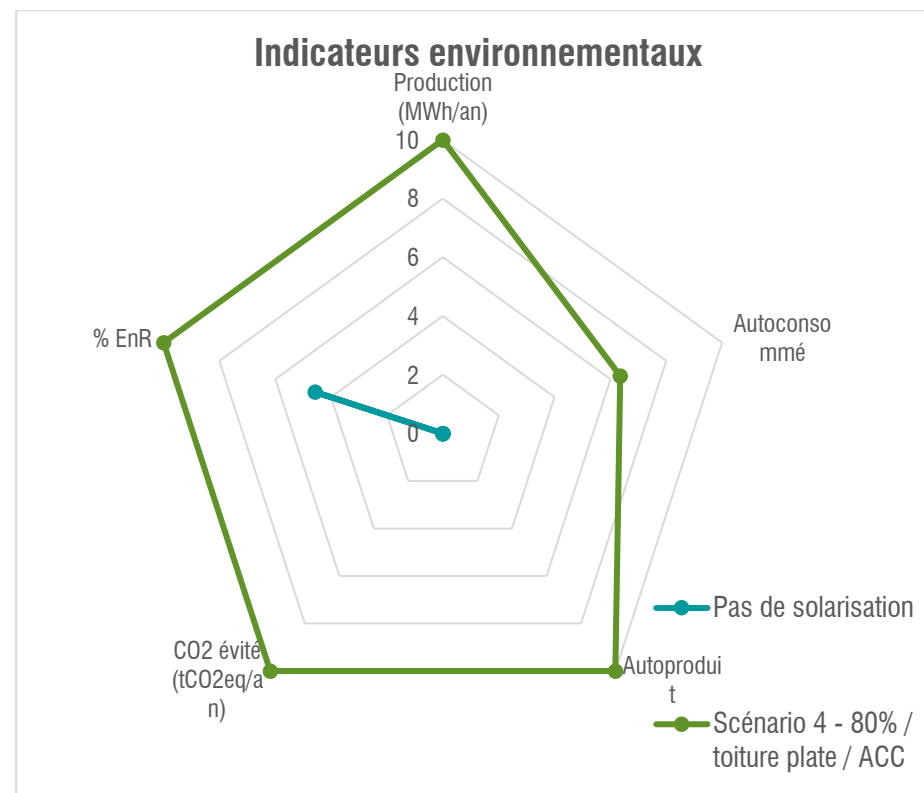
En termes d'indicateurs environnementaux, ce scénario présente des résultats moins favorables que le scénario 2, à l'exception de la production d'électricité, qui reste identique étant donné que la surface de panneaux photovoltaïques (PV) est la même. La différence s'explique principalement par le fait que l'autoconsommation collective, qui consiste à alimenter plusieurs bâtiments, permet de maximiser l'autoconsommation d'énergie.

D'un point de vue économique et environnemental, ce scénario est moins pertinent que le scénario 2, qui offre de meilleures performances environnementales pour un investissement moindre. Toutefois, l'autoconsommation individuelle présente l'avantage d'être plus simple à mettre en œuvre que l'autoconsommation collective.

6.5.5 Scénario 4



En raison de la surface de panneaux photovoltaïques (PV) installée, qui est deux fois plus grande que dans les autres scénarios, l'investissement nécessaire pour mettre en place ce scénario est également environ deux fois plus élevé. De plus, étant donné la puissance installée, cette installation ne peut en principe pas bénéficier de subventions. Toutefois, ce scénario génère l'économie de facture la plus importante, ce qui permet d'atteindre un temps de retour sur investissement (TRA) de 6 ans.



En dehors de l'autoconsommation, ce scénario présente les meilleures performances environnementales. Cela s'explique par une production d'énergie bien plus élevée, grâce à la surface de panneaux PV installée, ainsi que par l'implémentation d'une boucle d'autoconsommation collective. Ce dispositif permet de couvrir une plus grande part des besoins en énergie des bâtiments du quartier grâce à l'énergie solaire, maximisant ainsi le taux d'EnR et réduisant les émissions de CO2 liées à la consommation d'électricité. Cependant, la production d'électricité est telle qu'une grande partie ne peut être autoconsommée, ce qui explique pourquoi le taux d'autoconsommation reste inférieur à celui des autres scénarios.

6.6 Analyse croisée – Taux EnR

Ce tableau présente le taux EnR global selon le scénario thermique et le scénario électrique :

Taux d'EnR&R	Pas de solarisation	Scénario 2 - 40% / toiture plate / ACC	Scénario 3 - 40% / toiture plate / ACI	Scénario 4 - 80% / toiture plate / ACC
1 - PAC air/eau	52%	60%	53%	62%
1bis - PAC air/eau et - 10% besoins	52%	60%	53%	62%
2 - Raccordement RCU	65%	74%	67%	76%
3 - Géothermie sur champs de sondes	54%	62%	55%	64%
4 - Récupération sur ECS	53%	61%	54%	64%

Les scénarios présentant les meilleurs taux EnR sont ceux combinant le raccordement au RCU et les scénarios photovoltaïques en ACC

7. CONCLUSIONS

À l'issue de l'analyse technico-économique et environnementale, la combinaison la plus pertinente pour le projet repose sur :

- La réduction des besoins énergétiques (scénario 1 bis thermique) ;
- Le raccordement au réseau de chaleur urbain (RCU) (scénario 2 thermique) ;
- L'installation de panneaux photovoltaïques couvrant entre 50 % et 100 % des toitures solarisables, en autoconsommation collective (ACC) (scénarios 2 et 4 électriques).

Cette approche hybride permet de maximiser les gains environnementaux, d'optimiser les coûts d'exploitation et de renforcer la cohérence du projet avec les objectifs de transition énergétique portés par Nantes Métropole.

Les autres scénarios étudiés n'ont pas été retenus car ils présentent des limites techniques, économiques ou environnementales ne répondant pas de manière optimale aux objectifs du projet. :

- Scénario 1 thermique – Référence :

Bien que techniquement simple et peu coûteux à court terme, ce scénario repose majoritairement sur des pompes à chaleur électriques avec appoint gaz, induisant une forte dépendance aux énergies fossiles et une vulnérabilité aux variations de prix de l'énergie. Son bilan environnemental reste médiocre, avec des émissions de CO₂ élevées.

- Scénario 3 thermique – Géothermie sur champs de sondes :

Malgré un intérêt technique, la géothermie n'apporte que peu de bénéfices environnementaux par rapport à la référence, en raison de son utilisation partielle en appoint.

Le niveau d'investissement très élevé (plus de 4,7 M€) et le temps de retour long (34 ans) en font une option économiquement non viable à l'échelle du projet.

- Scénario 4 thermique – Récupération de chaleur sur eaux grises :

Ce scénario présente un gain environnemental marginal et une efficacité énergétique inférieure à celle des pompes à chaleur.

Bien qu'il permette un investissement initial légèrement réduit, son coût de chaleur est supérieur à la référence, limitant son attractivité économique.

- Scénario 3 électrique – 50% de toitures solarisées - ACI :

L'autoconsommation individuelle ne permet pas d'optimiser la production photovoltaïque, avec un taux d'autoconsommation et un rendement global inférieurs à ceux observés en autoconsommation collective.

Le temps de retour plus long et la valeur environnementale moindre expliquent le choix de privilégier une approche collective.

En résumé, ces scénarios présentent des compromis peu favorables face aux solutions retenues, qui combinent sobriété énergétique, mutualisation des ressources et efficacité économique.

7.1 Performances environnementales

La réduction des besoins constitue une première étape indispensable. En diminuant les consommations de chauffage et de refroidissement, elle permet :

- Une baisse de 25 % des émissions de CO₂ pour le chaud et de 11 % pour le froid ;
- Une amélioration du confort thermique ;
- Une réduction globale de la facture énergétique sans surinvestissement.

Combinée au raccordement au RCU, cette stratégie conduit à un taux global d'EnR&R compris entre 74 % et 76 %, contre 52 % pour le scénario de référence. Le RCU, alimenté à 74 % par une unité de valorisation énergétique (UVE) et à 26 % par du gaz, repose sur une énergie locale et mutualisée, contribuant activement à la décarbonation du territoire.

L'association de ces deux scénarios permet également de limiter les émissions carbone liées à la part importante de gaz dans l'alimentation du RCU et d'ainsi arriver à des émissions comparables à celle du scénario de référence. A long terme, un verdissement du RCU pourrait permettre de diminuer de manière encore plus importantes ces émissions.

Enfin, la production photovoltaïque en autoconsommation collective vient compléter ce mix énergétique en alimentant localement les usages électriques. Avec une solarisation de 50 % à 100 % des toitures, la part d'EnR électrique peut atteindre près de 55 %, tout en limitant les émissions de GES et la dépendance au réseau national.

7.2 Performances économiques

L'association de ces leviers offre une cohérence économique à long terme :

- Le raccordement au RCU permet de diviser par deux le coût de la chaleur (environ 110 €/logement/an contre 222 €/logement/an pour la référence) malgré un investissement initial plus élevé, avec un temps de retour estimé à 8 ans.

- La réduction des besoins renforce encore cette rentabilité en diminuant les puissances installées et les consommations d'énergie, limitant ainsi les charges futures.
- La solarisation photovoltaïque en ACC présente un excellent ratio coût/bénéfice, avec un temps de retour compris entre 5 et 6 ans, et des revenus issus de la revente du surplus de production injecté sur le réseau.

Cette configuration permet donc une bonne maîtrise des coûts globaux. Un équilibre sera à trouver entre les deux scénarios électriques afin d'optimiser les performances environnementales du projet selon le coût de l'installation.

7.3 Faisabilité technique

Sur le plan opérationnel, cette combinaison repose sur des solutions mûres, fiables et éprouvées :

- Le raccordement au réseau de chaleur s'appuie sur une infrastructure existante et mutualisée, garantissant une mise en œuvre sécurisée et progressive.
- La diminution des besoins découle de mesures architecturales et techniques simples à intégrer dès la conception des bâtiments.
- Le déploiement photovoltaïque en autoconsommation collective est désormais bien encadré réglementairement et peut être facilité par un tiers-investisseur ou une société de projet locale, permettant un portage financier équilibré.

Ces choix offrent ainsi une cohérence technique et réglementaire tout en restant compatibles avec le phasage de l'aménagement.

7.4 Synthèse

La combinaison Réduction des besoins + Raccordement au RCU + Solarisation photovoltaïque (50 à 100 % en ACC) constitue la solution la plus équilibrée pour le projet, tant sur le plan :

- Énergétique et environnemental :
 - Fort taux d'EnR&R (jusqu'à 76 %) ;
 - Réduction significative des émissions de CO₂ ;
 - Baisse des consommations et meilleure efficacité globale.
- Économique :
 - Coût de chaleur divisé par deux ;
 - Retour sur investissement rapide des installations solaires ;
 - Réduction durable des charges d'exploitation.
- Opérationnel :
 - Solutions éprouvées et facilement intégrables ;
 - Possibilité de phasage et de portage par des acteurs locaux.

Ces différentes solutions permettent également de s'inscrire dans la démarche de production d'énergie préconisée par l'ADEME et dans les objectifs de développements des énergies renouvelables de la Métropole Nantaise.

Cette combinaison représente donc une stratégie complète, performante et durable, conciliant sobriété énergétique, maîtrise des coûts et transition bas carbone à l'échelle du quartier.

RENDRE POSSIBLE LA TRANSFORMATION DE NOTRE SOCIÉTÉ POUR **PRÉSERVER LA PLANÈTE**

