

PROJET D'AMENAGEMENT DES RIVES DU GAVE DE PAU

Evaluation environnementale

ETUDE DE VALORISATION DU POTENTIEL EN ENERGIES RENOUVELABLES

4 36 3071



Projet d'aménagement Rives du Gave de Pau

Evaluation environnementale

Communauté de Communes Pau Béarn Pyrénées (CCPBP)

Etude de valorisation du potentiel en ENERGIES RENOUVELABLES

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI(E) PAR	APPROUVÉ(E) PAR	DATE
01	Version initiale	ENO	EPA	12/2023

ARTELIA Agence Pyrénées Gascogne
Hélioparc – 2 avenue Angot - CS 8011 – 64053 Pau Cedex 9 – TEL : 05 59 84 23 50

SOMMAIRE

OBJET DU DOCUMENT	5
1. CONTEXTE DU PROJET	5
1.1. Localisation du projet.....	5
1.2. SITUATION ET CONTRAINTES DU SITE..	6
1.3. Enjeux du projet.....	8
1.4. Caractéristiques du projet.....	10
2. BESOINS ÉNERGÉTIQUES	10
2.1. Rappel sur les différentes formes d'énergie.....	10
2.2. Règlementation	11
2.2.1. Caractérisation des besoins.....	13
3. POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES	14
3.1. Energie solaire	14
3.1.1. Gisement au droit du secteur d'étude	14
3.1.2. Valorisation de l'énergie solaire.....	16
3.1.2.1. Le solaire passif (Approche bioclimatique)	16
3.1.2.2. Le solaire thermique.....	17
3.1.2.3. Le solaire photovoltaïque	18
3.1.2.4. Climatisation solaire	19
3.2. Energie géothermique	20
3.2.1. La géothermie profonde (moyenne énergie à haute énergie)	21
3.2.2. La géothermie de surface (très faible à faible énergie)	22
3.3. L'aérothermie.....	24
3.4. La biomasse.....	25
3.4.1. Le gisement biomasse	25
3.4.2. Le bois énergie.....	25
3.4.3. Gisement au droit du secteur d'étude	26
3.5. Le biogaz	27
3.6. Réseau de chaleur	27
3.7. Energie éolienne.....	28
3.7.1. Valorisation de l'énergie	28
3.7.2. Gisement au droit du secteur d'étude	29
3.8. Récupération de la chaleur des eaux grises.....	30
4. SCÉNARIIS ÉNERGÉTIQUES RETENUS....	31

4.1. Généralités.....	31
4.2. Description des scénarii	31
4.2.1. Scénario 1.....	31
4.2.2. Scénario 2.....	32
4.2.3. Scénario 3.....	32
4.2.4. Scénario 4.....	32

FIGURES

Figure 1 :Localisation du projet des Rives du Gave de Pau (Source : Note Stratégique, 01 septembre 2023)	6
Figure 2 : Environnement proche du projet.....	6
Figure 3 : Vue aérienne du site (Source : Google earth)	6
Figure 4 : Contexte paysager du projet Rives Du Gave (Source : Note Stratégique ; groupement Chamss Arouise, UR, HBLA, Belvédère, EGIS ; 01 septembre 2023)	7
Figure 5 : Zones d’activités à proximité du secteur Rives du Gave de Pau (Source : Note Stratégique, groupement Chamss Arouise, UR, HBLA, Belvédère, EGIS, 01 septembre 2023).....	8
Figure 6 : Equipements de loisirs à proximité du secteur Rives du Gave de Pau (Source : Note Stratégique, groupement Chamss Arouise, UR, HBLA, Belvédère ,01 septembre 2023)	8
Figure 7 : Equipements à proximité du secteur Rives du Gave de Pau (Source : Note Stratégique ; groupement Chamss Arouise, UR, HBLA, Belvédère, EGIS ; 01 septembre 2023)	8
Figure 8 : Présentation du Plan Guide de la ZAC.....	9
Figure 9 : Programmation des différents îlots urbains	10
Figure 10 : Stades de l’énergie (Source :CEREMA)	11
Figure 11 : Ratios des besoins énergétiques de la ZAC.....	13
Figure 12 : Estimation des besoins énergétiques de la ZAC.....	13

5. ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE....	33
5.1. Dimensionnement technique	33
5.2. Coûts d’investissements	34
5.3. Emissions de CO2	35

Figure 13 : Besoins en énergie du projet par usage (Mwh _{ef} /an) 14	
Figure 14 : Durée d’enseiillement(1991-2020) et normales de température relevées par la station Biarritz-Pays-Basque (Source :Meteofrance, janvier 2023)	15
Figure 15 : Enseiillement journalier en France.....	15
Figure 16 : Enseiillement des façades (Source : https://www.maison-responsable.fr/energies-chauffages/solaire/energie-solaire-passive/).....	16
Figure 17 : Fonctionnement d’un mur trombe (Sources : https://amusementlogic.fr/nouvelles-generales/les-murs-trombe-en-architecture/ ; https://www.lepanneausolaire.net/installer-mur-trombe-lieu-place-d-serre-solaire.php)	16
Figure 18 : Fonctionnement d’un panneau solaire thermique (Source : https://www.maisonhabitatdurable-lillemetropole.fr/panneaux-solaires-thermiques)	17
Figure 19 : Estimation de la production d’eau chaude sanitaire par des panneaux solaires thermiques (Source : Tecsol).....	17
Figure 20 : Panneau photovoltaïque	18
Figure 21 : Estimation de la production d’énergie pour des capteurs solaires installés sur des toîts (Source : Tecsol)	19
Figure 22 : Type de climatiseur solaire thermique (Source : https://mac1-clim.com/climatisation-solaire-a-energie-renouvelable/).....	20
Figure 23 : Les différentes installations géothermiques	21

Figure 24 : Potentiel de la ressource géothermique profonde (>200m) sur la commune (Source :Géothermies)	21
Figure 25 : Potentiel géothermie profonde au droit du projet (Source : Géothermies)	22
Figure 26 : Potentiel géothermie de surface au droit du projet (Source : Géothermies)	23
Figure 27 : Principe d'une boucle tempérée et d'un champs de sondes géothermiques.....	23
Figure 28 : Fonctionnement Aérothermie Air / Eau (Source : https://guide.devisconseil.com/pompe-chaleur/aerothermie-air-eau)	24
Figure 29 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur air air réversible (Source : https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/pompe-chaleur-air-air)	24
Figure 30 : Matières mobilisables pour la biomasse (Source : ADEME).....	25
Figure 31 : Plan du réseau de chaleur urbain existant et programmé sur l'agglomération.....	28
Figure 32 :Principe de fonctionnement des éoliennes	28
Figure 33 :Eolien individuel	29
Figure 34 : Statistiques mensuelles sur la vitesse et la direction du vent pour Aéroport Pau-Pyrénées (Source : Winfinder)).....	29
Figure 35 : Zones potentiellement favorables au développement de l'éolien terrestre (Source : SIGENA)	30
Figure 36 : Schéma de fonctionnement	30
Figure 37 : Exemple de profil annuel de consommation en chauffage d'un logement collectif	33
Figure 38 : Puissances estimées.....	34
Figure 39 : Emissions de CO ₂ /an	35

OBJET DU DOCUMENT

Le projet d'aménagement Rives du Gave vise à construire une zone d'aménagement concertée de plus de 30 ha, partiellement en friche entre la gare de Pau, le centre-ville de Bizanos et les rives du Gave de Pau.

Ce projet est soumis à évaluation environnementale au titre de la rubrique 39 de l'article R122-2 du code de l'environnement car l'opération va créer une surface de plancher (SDP) supérieure à 40 000 m².

L'article L.300-1 du Code de l'Urbanisme du Grenelle de l'environnement prévoit 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. »

Ainsi, la présente étude de potentiel ENR est un outil d'aide à la décision permettant d'identifier en phase amont du projet les solutions d'énergies renouvelables pouvant être développées (solaire, géothermie, éolien...). L'objectif de cette étude est double :

- Favoriser une autonomie énergétique locale, en limitant le recours à des énergies fossiles qui sont de plus en plus coûteuses ;
- Lutter contre le réchauffement climatique, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre issues de ressources fossiles.

1. CONTEXTE DU PROJET

1.1. LOCALISATION DU PROJET

Porté par la Communauté d'Agglomération Pau Béarn Pyrénées (CAPBP), le projet Rives du Gave se déploie sur un site de plus de 22,5 ha, à cheval sur les communes de Pau, Bizanos, Gelos et Mazères-Lezons, dans le département des Pyrénées-Atlantiques (64). Plus précisément, il est implanté entre la gare SNCF, l'avenue Gaston Lacoste, l'avenue Léon Heid et le stade des Eaux vives.

Il s'agit d'un projet de requalification urbaine d'un site en partie en friche situé en contre-bas du boulevard des Pyrénées, lieu emblématique de Pau.

Le site bénéficie donc d'une bonne desserte routière et viaire :

- à l'échelle locale par son ouverture sur les centres-villes de quatre communes centrales ;
- à l'échelle de l'agglomération par sa proximité de la rocade et d'axes structurants ;
- à l'échelle régionale, il est accessible en 15 minutes depuis l'A64 en empruntant l'avenue Dufau ,la rocade Est ou la desserte ferroviaire.

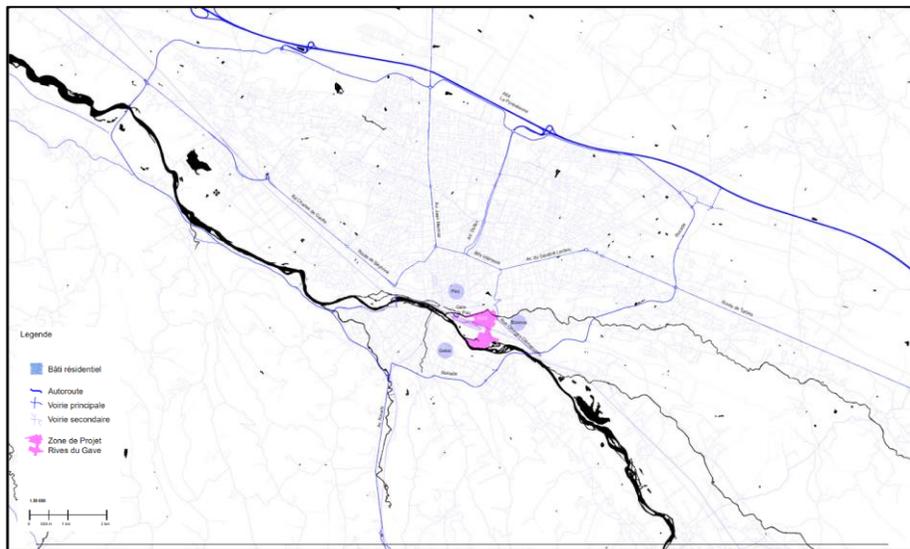


Figure 1 : Localisation du projet des Rives du Gave de Pau (Source : Note Stratégique, 01 septembre 2023)



Figure 3 : Vue aérienne du site (Source : Google earth)

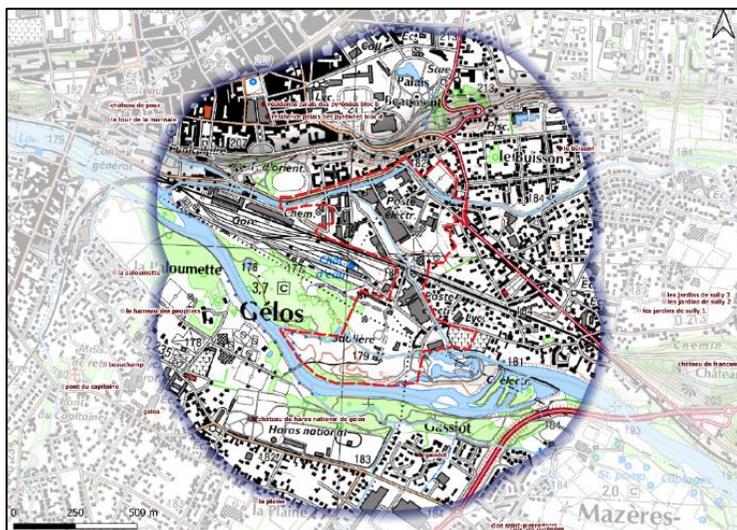


Figure 2 : Environnement proche du projet

1.2. SITUATION ET CONTRAINTES DU SITE

Le quartier Rives du Gave possède une localisation privilégiée puisqu'il est non seulement situé à proximité de la gare, point de rencontre de plusieurs lignes de transport public, mais également des principaux pôles économiques de l'agglomération. De plus, le quartier des Rives du Gave est au contact du centre historique de Pau qui concentre de nombreux équipements (scolaires notamment) et des rez-de-ville actifs (commerces, services...). De nombreux équipements publics sportifs sont également présents dans les environs immédiats du quartier : stade Tissié, stade de foot Jean Larqué (anciennement JAB), stade nautique, stade des eaux vives, skate park...

Outre la localisation géographique du site, ce dernier est marqué par un réseau hydraulique structurant le paysage : l'Ousse au nord, le Gave de Pau au sud, et le canal Heid au centre. Le site est bordé au sud et à l'ouest par des espaces boisés en

partie classés en relation avec le Gave de Pau. Ces espaces classés forment avec le Parc du Château et les bois qui s'étirent depuis le Château de Franqueville et le long du Chemin d'Henri IV, une sorte de système de parcs boisés protégés. Ils dessinent une figure paysagère s'étirant le long des vallées de l'Ousse et du Gave de Pau et se prolongeant en amont et en aval au-delà des limites de l'agglomération.

Malgré sa position privilégiée en cœur d'agglomération, cet espace longé par deux infrastructures de transport majeures (la Rocade et la voie ferrée Toulouse-Bayonne) est longtemps resté à l'écart des dynamiques de développement urbain. Il faut dire que le site présente certaines contraintes d'aménagement liés à son passé industriel.

En effet, le passé industriel a laissé son empreinte avec la présence de bâtiments abandonnés nécessitant une intervention de requalification. Aussi, le site du projet est marqué par une importante pollution des sols due à ses activités passées. Bien que certaines de ces activités aient déjà procédé à une dépollution partielle lors de leur cessation, une évacuation des couches superficielles des sols reste nécessaire.

Le site est également soumis à des contraintes hydrauliques significatives notamment en raison de sa proximité avec l'Ousse et le Gave. Les documents d'urbanisme imposent des contraintes de constructibilité pour limiter les risques et la vulnérabilité face aux inondations, avec des zonages différenciés. En conséquence, les aménagements doivent être adaptés selon les zones : en zone d'aléas fort, il est interdit de construire des logements et les activités doivent se situer en R+1 ; en zone verte, les rez-de-chaussée doivent être construits au-dessus du niveau des crues et être résilients dans leurs matériaux.

En plus des contraintes de pollution et hydrauliques, le site rencontre des défis physiques liés à la présence de nombreuses lignes électriques et à une voie ferrée active. Ces infrastructures compliquent la planification et la mise en œuvre des travaux d'aménagement. Ces éléments imposent une approche coordonnée et minutieuse pour réussir la transformation du site en un espace viable et accueillant.

Malgré ces contraintes, le site bénéficie d'une situation paysagère inédite, à l'interface entre la plaine du Gave et les coteaux boisés, offrant des vues lointaines remarquables sur la chaîne des Pyrénées. La présence de l'eau, avec le Gave et le canal Heïd, confère au site une identité singulière et un potentiel de valorisation important.

Fort de ce patrimoine industriel, naturel et paysager, le site des Rives du Gave constitue un territoire unique, porteur d'une histoire et d'une géographie particulière. Le projet urbain devra composer avec cette richesse et ces contraintes pour révéler tout le potentiel de ce site stratégique au cœur de l'agglomération paaloise.

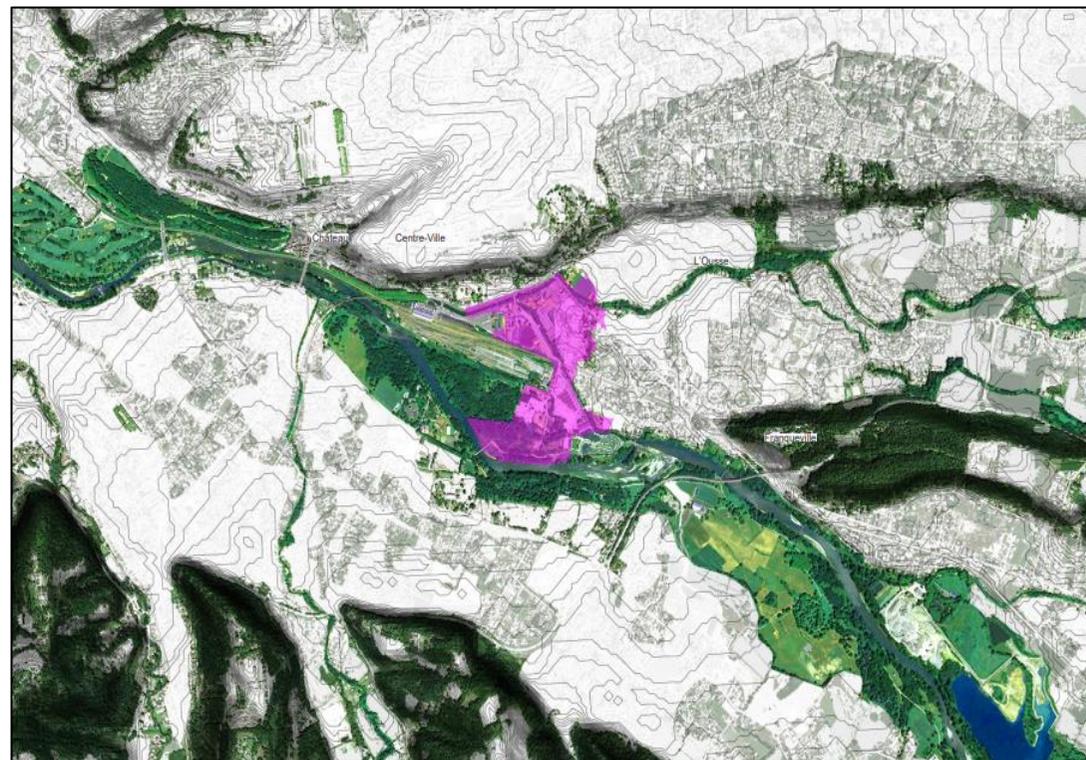


Figure 4 : Contexte paysager du projet Rives Du Gave (Source : Note Stratégique ; groupement Chamss Arouise, UR, HBLA, Belvédère, EGIS ; 01 septembre 2023)

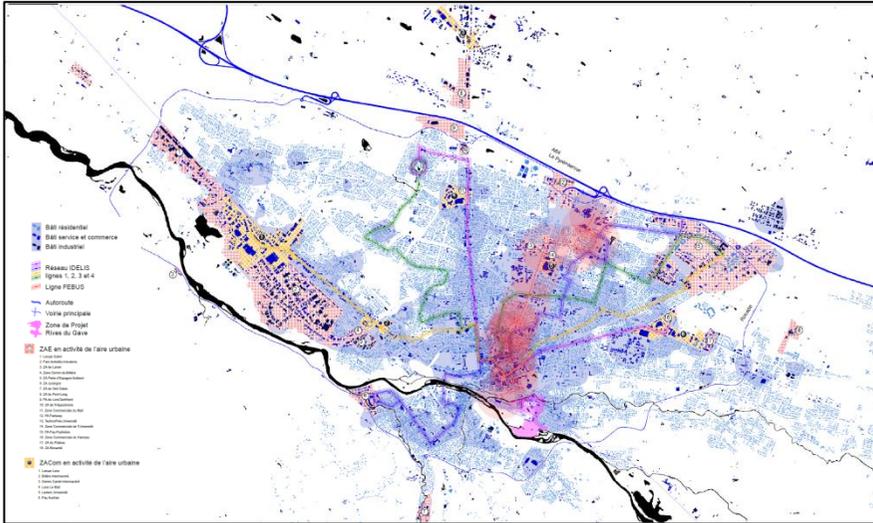


Figure 5 : Zones d'activités à proximité du secteur Rives du Gave de Pau (Source : Note Stratégique, groupement Chamss Arouise, UR, HBLA, Belvédère, EGIS, 01 septembre 2023)

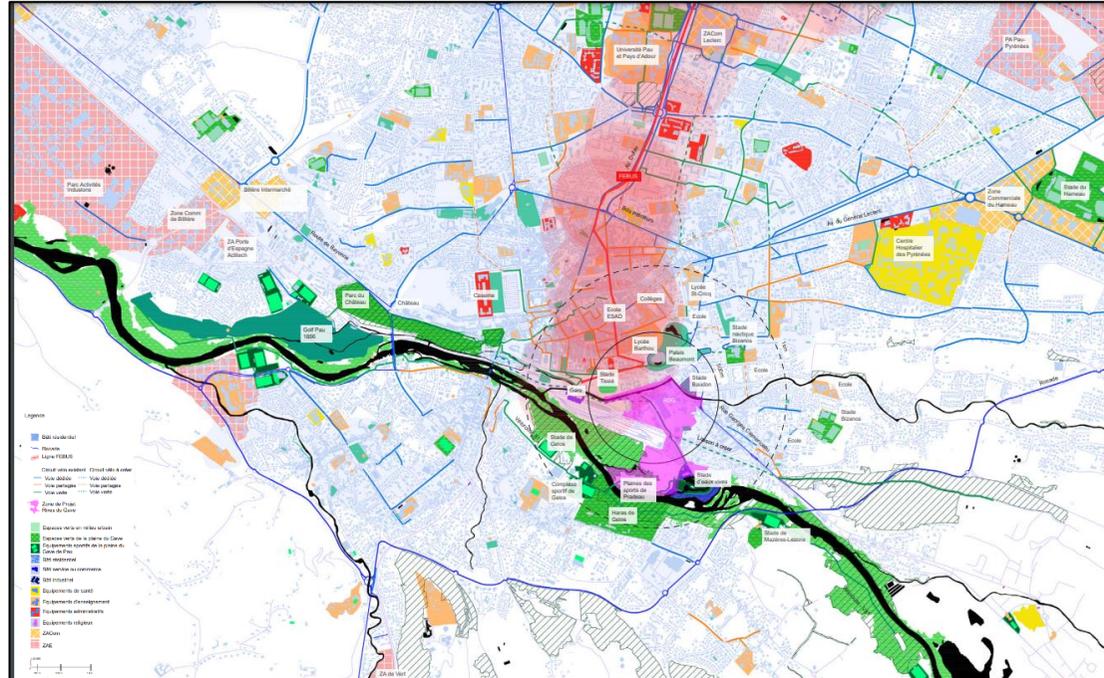


Figure 7 : Equipements à proximité du secteur Rives du Gave de Pau (Source : Note Stratégique ; groupement Chamss Arouise, UR, HBLA, Belvédère, EGIS ; 01 septembre 2023)

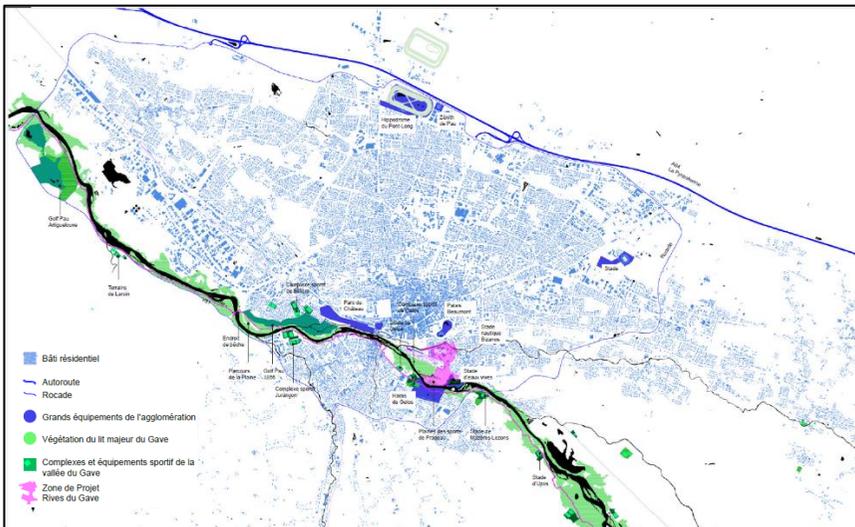


Figure 6 : Equipements de loisirs à proximité du secteur Rives du Gave de Pau (Source : Note Stratégique, groupement Chamss Arouise, UR, HBLA, Belvédère, 01 septembre 2023)

1.3. ENJEUX DU PROJET

Après plusieurs décennies de réflexions, la Communauté d'Agglomération Pau Béarn Pyrénées (CAPBP) a décidé d'engager un grand projet de requalification urbaine sur ce site à fort potentiel. Les ambitions du projet Rives du Gave sont multiples :

- Désenclaver le site et le reconnecter au tissu urbain environnant, notamment Pau et Bizanos

- Dépolluer et reconverter les friches industrielles, en particulier le site De-housse
- Créer un nouveau quartier mixte et animé, mêlant logements, activités économiques, équipements et espaces publics de qualité
- Créer un grand parc naturel et sportif au bord du Gave, mettant en valeur ce patrimoine paysager et support d'activités de loisirs et de détente
- Mettre en valeur les atouts naturels et patrimoniaux du site (Gave, Ousse, canal Heïd, anciens bâtiments industriels...)
- Renforcer la cohésion territoriale de l'agglomération en créant du lien entre les différentes communes
- Conforter l'attractivité résidentielle et économique du cœur d'agglomération



Figure 8 : Présentation du Plan Guide de la ZAC

1.4. CARACTERISTIQUES DU PROJET

Le projet s'inscrit sur un parcellaire d'environ 234 000 m² et proposera à terme plusieurs ensemble de bâti avec des vocations variées (îlots mixtes), allant du logement au commerce, en passant par des espaces de travail et de restauration.

La programmation principale du projet prise en compte dans la présente étude se décompose comme suit :

Îlot	SDP îlot	Logement individuel	Logement collectif	Artisanat/bureaux	Tertiaire/hôtellerie	Equipements (loisirs,santé)	Enseignement	Commerces
D1	6334				6134			200
D2	12039			4000	5000		3039	
D3								
D4	6670				6470			200
D5	10770						10770	
D6	8185		5985		2000			200
D7a	2395		2195					200
D7b	2248		2248					
D7c	1043		1043					
D7d	1200		1200					
D7e	1687	1687						
D7f	845	845						
D8a	1891		1541			150		200
D8b	719	719						
D8c	722	722						
D9a	1769	1769						
D9b	1641	1641						
D9c	659	659						
D9d	484	484						
D10	2000		2000					
G1	2825			2825				
G2	9400		9200					200
G3	10201			1674	7216	711		600
G4	6451		3951		2000			500
R1								
R2	6231		3931		2300			
R3	8980		8980					
R4a	5600		5400					200
R4b	2200		2200					
R5	7999		1499			5000		1500
Total SDP (m2)	123188	8526	51373	8499	31120	5861	13809	4000

avec 1011 logement individuels et 798 logements collectifs et 1326 places de parking projetées sur le site

VOISINÉE DEHOUSSE

D1 Tertiaire + RDC actifs
 D2 Tertiaire + Cité Artisanale
 D3 Sous station Electrique Existante
 D4 Tertiaire
 D5 Enseignement
 D6 Programme mixte (logements, tertiaire)
 D7 a/b/c/d/e/f Logement + béguinage + RDC actifs
 D8 a/b/c Logement + RDC actifs
 D9 a/b/c/d Logement
 D10 Logement spécifique (résid. autonomie)

VOISINÉE GARE

G1 Artisanat
 G2 Logement + RDC actifs
 G3 a/b/c/d Programme mixte (logement spécifique, artisanat, équipements de santé) + RDC actifs
 G4 Programme mixte (logements, tertiaire) + RDC actifs

VOISINÉE RIVES

R1 Programme existant (éducation supérieure)
 R2 a/b/c/d Programme mixte (logements, tertiaire)
 R3 a/b Logements
 R4 a/b Logements
 R5 a/b Programme mixte (équipements sportifs, guinguette)

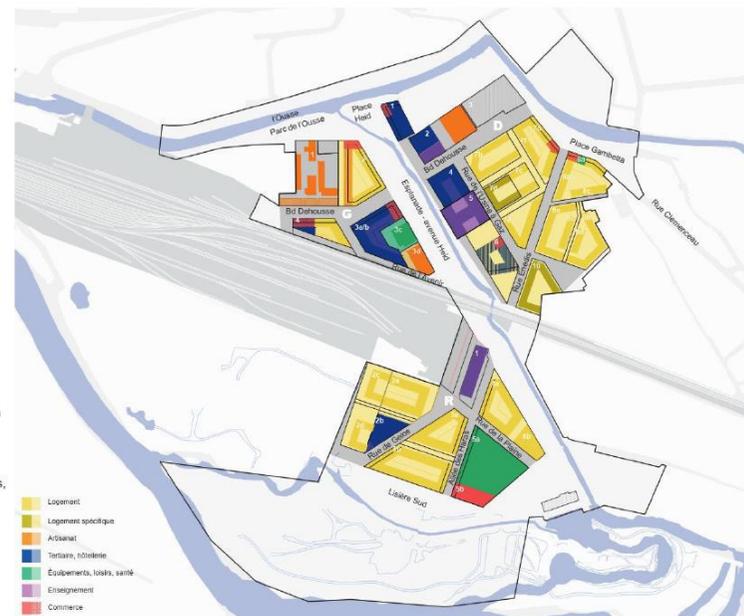


Figure 9 : Programmation des différents îlots urbains

2. BESOINS ENERGETIQUES

2.1. RAPPEL SUR LES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIE

Plusieurs formes d'énergie sont utilisées pour caractériser la performance énergétique d'un bâtiment :

- **L'énergie primaire** (en kWh_{ep}) : elle correspond à une source d'énergie brute (non transformée) puisée dans la nature. Il s'agit par exemple du gaz naturel, du soleil, du bois, du vent, du charbon... Pour être utilisées, elles

doivent être transformées ou converties. C'est cette énergie qui est prise en compte dans la réglementation environnementale pour évaluer les impacts des projets sur la planète. Elle sera donc utilisée dans la suite de l'étude.

- **L'énergie finale** (en kWh_{ef}) : Il s'agit de l'énergie directement livrée pour sa consommation finale aux utilisateurs et facturée (énergie utilisée pour le chauffage ou l'éclairage). Elle a des valeurs supérieures à l'énergie utile car entre les deux on a les pertes de distribution et d'émission. Elle sera également utilisée.
- **L'énergie utile** (kWh_{eu}) : elle correspond à la quantité d'énergie vraiment utilisée par les appareils pour fonctionner.

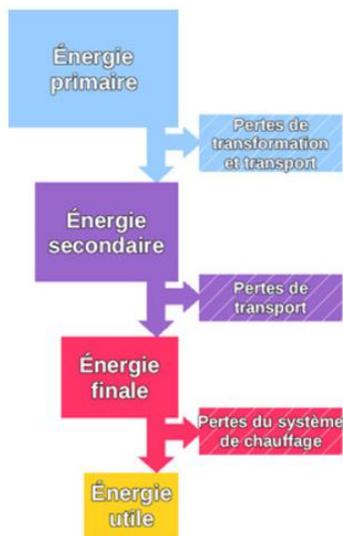


Figure 10 : Stades de l'énergie (Source :CEREMA)

2.2. REGLEMENTATION

Le 1^{er} janvier 2022, la réglementation environnementale 2020 est entrée en vigueur Elle est entrée en vigueur pour l'habitation et à compter du 1^{er} juillet 2022 pour les bâtiments de bureaux et d'enseignement primaire ou secondaire, remplaçant ainsi la réglementation thermique 2012 (RT 2012).

La RT 2012, en réponse au Grenelle de l'Environnement (2009), a eu pour objectif de généraliser les bâtiments basse consommation au travers d'une obligation de maîtrise des besoins et des consommations énergétiques et d'un objectif de performance sur le confort d'été. La RE 2020 quant à elle répond à la loi de Transition énergétique pour la croissance verte (LTECV 2015) et à la loi Évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (ELAN 2018). Elle poursuit des objectifs d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments neufs, de réduction de leur impact sur le climat (prise en compte des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments) et de leur adaptation aux conditions climatiques futures (renforcement du confort d'été).

Elle est basée sur les indicateurs suivants :

Energie	Bbio [points]	Besoins bioclimatiques	Évaluation des besoins de chaud, de froid (que le bâtiment soit climatisé ou pas) et d'éclairage.	
	Cep [kWhep/(m ² .an)]	Consommations d'énergie primaire totale	Évaluation des consommations d'énergie renouvelable et non renouvelable des 5 usages RT 2012 : chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation et auxiliaires +	ÉVOLUTION
	Cep,nr [kWhep/(m ² .an)]	Consommations d'énergie primaire non renouvelable	1. éclairage et/ou de ventilation des parkings 2. éclairage des circulations en collectif 3. électricité ascenseurs et/ou escalators	NOUVEAU
Carbone	Ic énergie [kg eq. CO ₂ /m ²]	Impact sur le changement climatique associé aux consommations d'énergie	Introduction de la méthode d'analyse du cycle de vie pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des énergies consommées pendant le fonctionnement du bâtiment, soit 50 ans.	NOUVEAU
	Ic construction [kg eq. CO ₂ /m ²]	Impact sur le changement climatique associé aux « composants » + « chantier »	Généralisation de la méthode d'analyse du cycle de vie pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des produits de construction et équipements et leur mise en œuvre : l'impact des contributions « Composants » et « Chantier ».	NOUVEAU
Confort d'été	DH [°C.h]	Degré-heure d'inconfort : niveau d'inconfort perçu par les occupants sur l'ensemble de la saison chaude	Évaluation des écarts entre température du bâtiment et température de confort (température adaptée en fonction des températures des jours précédents, elle varie entre 26 et 28°C).	NOUVEAU

Les principales évolutions introduites par la RE 2020 sur le volet de la performance énergétique sont synthétisées ci-dessous :

Principales évolutions	RT 2012	RE 2020
Périmètre d'évaluation des consommations énergétiques des usages immobiliers	5 usages RT : chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation et auxiliaires	5 usages RT 2012 : chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation et auxiliaires, auxquels s'ajoute : <ul style="list-style-type: none"> ► la consommation d'électricité nécessaire au déplacement des occupants à l'intérieur du bâtiment, s'il y en a : ascenseurs et/ou escalators ; ► la consommation d'électricité pour les parkings des systèmes suivants : systèmes d'éclairage et/ou de ventilation, s'il y en a ; ► la consommation d'électricité des circulations en logement collectif pour l'éclairage.
Indicateur des besoins énergétiques : Bbio en points	Besoins énergétiques du bâtiment pour assurer le chauffage, le refroidissement et l'éclairage	Bbio RT 2012 modifié par : <ul style="list-style-type: none"> ► Prise en compte systématique des besoins de froid (qu'un système de climatisation soit installé ou pas les besoins de froid seront calculés).
Indicateur des consommations conventionnelles d'énergie : Cep en kWh/(m².an)	Chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation et auxiliaires Dédution faite de toute production d'électricité à demeure	<ul style="list-style-type: none"> ► Prise en compte d'usages immobiliers supplémentaires (cf. périmètre d'évaluation). L'indicateur ne comptabilise pas, en tant que consommations d'énergie, les énergies renouvelables captées sur la parcelle du bâtiment et autoconsommées. ► Pénalisation forfaitaire des consommations en cas d'inconfort d'été potentiel.
<ul style="list-style-type: none"> ► Pour le calcul de Cep : Coefficient de conversion en énergie primaire 	<ul style="list-style-type: none"> ► Électricité = 2,58 ► Autres énergies importées par le bâtiment = 1 ► Énergie renouvelable captée sur le bâtiment = 0 	<ul style="list-style-type: none"> ► Électricité = 2,3 ► Bois = 1 ► Réseau urbain de chauffage ou de froid = 1 ► Autres énergies non renouvelables = 1 ► Énergie renouvelable captée sur le bâtiment ou la parcelle = 0

Principales évolutions	RT 2012	RE 2020
Indicateur des consommations conventionnelles d'énergie : Cep,nr en kWh/(m².an)	N'existe pas	Nouvel indicateur, proche de l'indicateur Cep, introduit pour la RE 2020 : il prend en compte uniquement des consommations en énergie primaire non renouvelable du bâtiment. Les économies d'énergie doivent porter en priorité sur les énergies non renouvelables.
<ul style="list-style-type: none"> ► Pour le calcul de Cep,nr : Coefficient de conversion en énergie primaire 		<ul style="list-style-type: none"> ► Électricité = 2,3 ► Énergies renouvelables = 0 ► Réseau urbain de chauffage : 1 – Taux EnR&R ► Réseau urbain de froid : 1 ► Autres énergies non renouvelables = 1
Indicateur de confort d'été : DH en °C.h	Ticref : température intérieure maximale atteinte au cours d'une séquence de 5 jours très chauds d'été	Degré-heure d'inconfort noté DH en °C.h : niveau d'inconfort perçu par les occupants sur l'ensemble de la saison chaude. Il s'agit de la somme de l'écart entre la température de l'habitation et la température de confort (température adaptée en fonction des températures des jours précédents).
Sref : surface de référence	<ul style="list-style-type: none"> ► S_{ref} pour le résidentiel ► Surface utile (SU) pondérée d'un coefficient pour le tertiaire 	<ul style="list-style-type: none"> ► Surface habitable (SHAB) pour le résidentiel ► Surface utile (SU) pour le tertiaire
Perméabilité à l'air : Q_{4Pa_surf} en m³/(h.m²)	<ul style="list-style-type: none"> ► 0,6 pour la MI ► 1 pour les logements collectifs 	<ul style="list-style-type: none"> ► 0,6 pour la MI ► 1 pour les logements collectifs ► 1,7 pour les bâtiments de bureaux ou d'enseignement primaire ou secondaire, hors immeubles de grande hauteur et hors bâtiments supérieurs à 3 000 m² <p>Majorations de la mesure introduite :</p> <ul style="list-style-type: none"> ► multipliée par 1,2 si réalisée par échantillonnage ► augmentée de 0,3 m³/(h.m²) si des travaux pouvant impacter la perméabilité à l'air restent à réaliser.
Scénarios météorologiques		Les scénarios météorologiques sont mis à jour par : <ul style="list-style-type: none"> ► l'actualisation des années de référence : années-type dont la constitution a été effectuée sur la base de fichiers Météo-France sur la période de janvier 2000 à décembre 2018 ; ► la modification de deux stations météo : La Rochelle remplacée par Tours et Nice par Marignane.
Scénario d'occupation		Les scénarios d'occupation ont été ajustés pour rendre compte de manière plus réaliste du comportement des usagers. Néanmoins, il s'agit toujours de scénarios conventionnels et de profils moyens, de sorte que les résultats ne peuvent être utilisés comme outil de prédiction des consommations.

2.2.1. Caractérisation des besoins

L'estimation des besoins énergétiques du projet est évaluée sur la base de ratio énergétiques surfaciques suivant la typologie des bâtiments. Elles sont issues :

- Des études de consommations énergétiques des secteurs tertiaire et résidentiel réalisées en 2020 et 2021 par le CEREN et le SDES. Les données du SDES, à climat réel ont fait l'objet d'une correction visant à prendre en considération le climat local,
- De l'étude « Réseaux de chaleur bois Domaine de pertinence » de 2017, du Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable, qui présente une estimation des consommations de chaleur et d'ECS de logements pour des bâtiments soumis à la RE 2020.

Une diminution de 20%, conformément aux objectifs de réduction de la consommation énergétique primaire de la RE 2020, a été appliquée à ces ratios.

Les calculs énergétiques ont été effectués à partir de la surface de référence ($m^2 S_{ref}$), spécifique à la réglementation environnementale. Elle est obtenue ici en appliquant coefficient de 0,9 aux surfaces de plancher.

Les besoins estimés sont séparés en quatre catégories :

- Les besoins de chauffage,
- Les besoins d'ECS,
- Les besoins de climatisation,
- Les besoins d'électricité : ce besoin concerne l'ensemble des postes consommant de l'électricité (éclairage, ventilation et auxiliaires).

Les tableaux ci-dessous présentent les ratios énergétiques utilisés ainsi que les besoins annuels en énergie du projet :

	Ratio des besoins en kWef/m2/an			
	Chauffage	Climatisation	ECS	Usages spécifique électricité(Eclairage, ventilation, auxiliaires)
Logement	79	0,5	12	18
Artisanat/bureaux	92	29	5	75
Tertiaire/hôtellerie	84	23	32	94
Equipements (loisirs,santé)	92	13	39	34
Enseignement	74	2	11	15
Commerces	88	19	12	60

Figure 11 : Ratios des besoins énergétiques de la ZAC

	Chauffage	Climatisation	ECS	Usages spécifiques électricité (Eclairage, ventilation, auxiliaires)
Logement	4265068	25359	621289	947184
Artisanat/bureaux	703534	220967	41550	573621
Tertiaire/hôtellerie	2339004	632981	906115	2629391
Equipements (loisirs,santé)	487021	68785	208211	178165
Enseignement	914708	25055	136311	191790
Commerces	315144	70128	41990	214301
Total besoin (MWhef/an)	9024	1043	1955	4734
Total projet (MWhef/an)	16758			

Figure 12 : Estimation des besoins énergétiques de la ZAC

Comme le montre le graphique ci-dessous, les principaux postes de consommation du projet sont le chauffage et l'électricité.

Estimation de la répartition des besoins énergétiques du projet (Mwh_{ef}/an)



- Chauffage
- Climatisation
- ECS
- Usages spécifiques électricité (Eclairage, ventilation, auxiliaires)

Figure 13 : Besoins en énergie du projet par usage (Mwh_{ef}/an)

3. POTENTIEL DE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES

Ce chapitre permet de présenter l'éventail des différentes sources d'énergie renouvelables disponibles au droit du périmètre de projet, ainsi que les techniques de valorisation qui leur sont associées.

Les sources d'énergie étudiées sont les suivantes :

- L'énergie solaire ;
- La biomasse ;
- La géothermie ;

- La récupération de l'énergie des déchets ;
- Le réseau de chaleur ;
- L'énergie éolienne.

Ces différentes sources d'énergie ont vocation à produire de l'électricité afin d'alimenter principalement les appareils électroménagers et d'éclairage. Elles peuvent encore être utilisées sous forme d'énergie thermique pour alimenter les systèmes de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire (ECS).

3.1. ENERGIE SOLAIRE

3.1.1. Gisement au droit du secteur d'étude

Il est possible d'estimer le nombre de kWh produit par une installation en fonction de sa puissance en kWc. La puissance crête est la puissance des modules photovoltaïques exprimée en Watt crête (Wc). Il s'agit de la puissance maximale que va produire le panneau solaire dans des conditions standardisées.

La station permettant de caractériser au mieux les conditions climatiques de la région paloise est celle de Biarritz-Pays-Basque. Sur la période de référence 1991-2020, la durée d'ensoleillement par an est d'environ **1921 h** avec un maximum en juillet et un minimum en décembre.

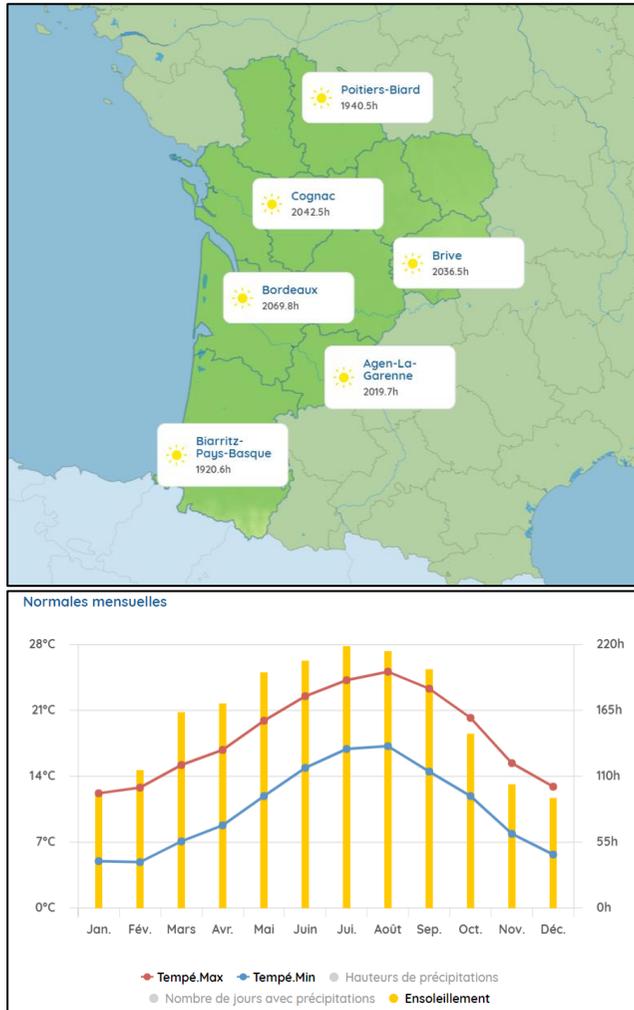


Figure 14 : Durée d'ensoleillement(1991-2020) et normales de température relevées par la station Biarritz-Pays-Basque (Source :Meteofrance, janvier 2023)

En France, l'ensoleillement journalier est compris entre 3 et 5 kWh par m² et par jour (voir carte ci-dessous). Dans la région paloise, l'énergie moyenne reçue par une surface de 1 m², orientée Sud et inclinée d'un angle égal à la latitude est d'environ 4,5 kWh/m²/ jour, soit environ **1643 kWh/m²/an**. En prenant en considération la durée d'ensoleillement annuel (1921 h) et l'énergie solaire reçue annuellement, il est possible d'obtenir une puissance moyenne d'ensoleillement de **855 W/m²**.



Figure 15 : Ensoleillement journalier en France

Le secteur d'étude bénéficie d'une localisation avantageuse pour la mise en place de systèmes de production solaire.

3.1.2. Valorisation de l'énergie solaire

Le gisement solaire peut être exploitable de manière active ou passive sous différentes formes :

- Le solaire passif,
- Le solaire thermique,
- Le solaire photovoltaïque.

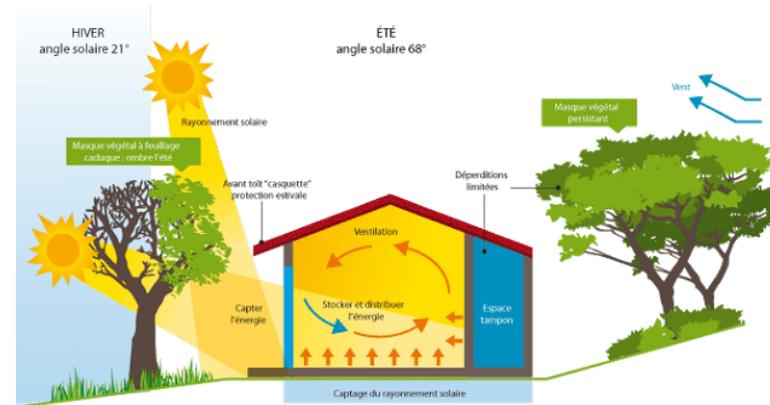


Figure 16 : Enssoleillement des façades (Source : <https://www.maison-responsable.fr/energies-chauffages/solaire/energie-solaire-passive/>)

3.1.2.1. Le solaire passif (Approche bioclimatique)

Le solaire passif regroupe les solutions, essentiellement constructives qui permettent au bâtiment de récupérer les apports d'énergie solaire à travers principalement ses vitrages. Les occupants sollicitent ainsi moins le chauffage et l'éclairage.

La démarche d'utilisation de l'énergie solaire passive peut être décrite en plusieurs étapes :

- Recul suffisant entre les bâtiments ou parties du bâtiment lui-même (patios) pour permettre un accès au soleil jusqu'aux façades des étages bas ;
- Ouverture de la façade au Sud, Est et Ouest pour profiter au maximum des apports solaires passifs captés par les surfaces vitrées ou grâce à des dispositifs comme un mur trombe.

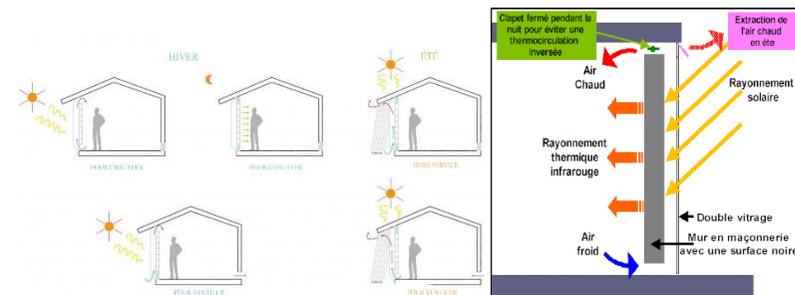


Figure 17 : Fonctionnement d'un mur trombe (Sources : <https://amusementlogiq.fr/nouvelles-generales/les-murs-trombe-en-architecture/>; <https://www.lepanneausolaire.net/installer-mur-trombe-lieu-place-d-serre-solaire.php>)

Ces techniques de construction sont uniquement des optimisations de la conception et n'engendrent aucun surcoût particulier à l'échelle d'un projet.

3.1.2.2. Le solaire thermique

Le principe du solaire thermique est d'utiliser l'énergie provenant du rayonnement solaire pour la convertir en énergie thermique pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) ou le chauffage.

Pour la production d'eau chaude, des capteurs solaires captent la chaleur du rayonnement solaire, récupérant ainsi l'énergie solaire grâce à un fluide caloporteur circulant dans ces derniers. Par l'intermédiaire d'un échangeur thermique, l'énergie est transférée dans le ballon solaire pour préchauffer l'eau froide. Une énergie d'appoint apporte le complément d'énergie si l'ensoleillement n'est pas suffisant. Un thermostat associé à cet appoint permet de garantir le maintien de la température de sortie de l'eau à la consigne désirée.

Pour la production d'air chaud, le principe reste le même mais l'air remplace l'eau et est soit injecté directement dans le local soit passe dans un échangeur thermique pour préchauffer un autre fluide.

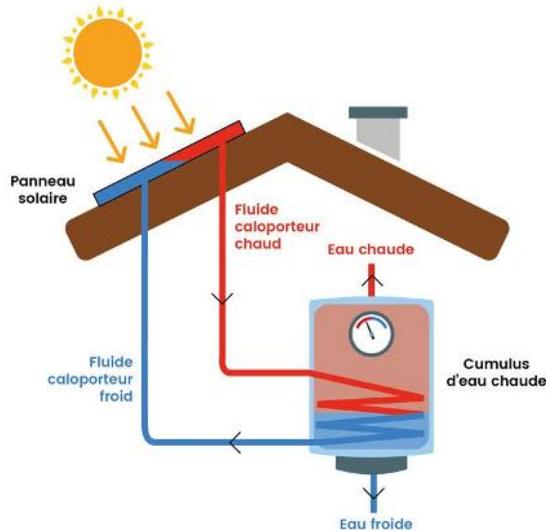


Figure 18 : Fonctionnement d'un panneau solaire thermique (Source : <https://www.maisonhabitatdurable-lillemetropole.fr/panneaux-solaires-thermiques>)

Les besoins en eau chaude sanitaire des logements et du secteur tertiaire/hotellerie étant assez importants, il semble opportun d'installer de tels systèmes sur les toitures de tels bâtiments.

Pour donner un ordre de grandeur, 100 m² de panneaux solaires thermiques orientés plein sud et inclinés à 45° peuvent délivrer environ **68 MWh/an**, avec un taux de couverture des besoins de près de 68%. La productivité solaire est de 680 kWh/m²/an.

Pau, latitude : 43°22

Installation												
Circuit hydraulique			Schéma ECS				Système			Circuit primaire		
Schéma ECS	collectif		Surface	99,76 m ²			Situation	Intérieur (°C)			Apports solaires indirects au bouclage	
Système	Échangeur externe - 2 pompes		WTS F1 - K1 WEISHAUPT SA (43 x 2,32 m ²)				Température ECS	60 °C			Boucle qualité moyenne	
Circuit primaire	Automatique		Inclinaison	45 °/Horiz			Volume de stockage	5000 Litres			Longueur boucle	
Echangeur	Automatique		Orientation	0°/Sud			Cote de refroidissement	0,1W/m ² .°C			Perte linéique	
T° EF	méthode ESM2		Coefficient n0	0,8			T°C Maxi	80 °C			Pertes de bouclage	
			Coefficient a1	3,6W/m ² .°K								
			Coefficient a2	0,01W/m ² .°K								

SOLO 2018															
	Global Horiz (Wh/m ² .jour)	Global Capteur (Wh/m ² .jour)	Global dispo (Wh/m ² .jour)	T° extérieure (°C)	T° amb stock (°C)	Temp EF	Volume	Temp ECS	Besoins production (kWh/jour)	Production primaire (kWh/jour)	Production solaire (kWh/jour)	Taux couv solaire(%)	Pertes bouclage (kWh/jour)	Besoins totaux (kWh/jour)	Taux économie énergie (%)
Janvier	1536	2518	2488	5,5	60,0	9,0	4921	60	291,8	111,2	126,3	43,3	134,7	426,6	29,6
Février	2131	2879	2861	6,2	60,0	9,3	4921	60	289,8	134,7	148,5	51,2	133,6	423,5	35,1
Mars	3312	3928	3913	9,5	60,0	11,0	4921	60	280,4	180,9	194,7	69,4	128,3	408,8	47,6
Avril	4120	4125	4100	11,4	60,0	11,9	4921	60	275,0	193,9	209,4	76,2	125,3	400,3	52,3
Mai	5070	4650	4595	14,2	60,0	13,3	4921	60	267,0	209,0	229,1	85,8	120,9	387,8	59,1
Juin	5500	4832	4743	17,7	60,0	15,1	4921	60	256,9	211,0	234,8	91,4	115,3	372,2	63,1
Juillet	5628	5035	4957	19,5	60,0	16,0	4921	60	251,8	213,2	240,4	95,5	112,4	364,2	66,0
Août	4579	4409	4374	19,5	60,0	16,0	4921	60	251,8	200,3	220,7	87,7	112,4	364,2	60,6
Septembre	3895	4378	4362	17,6	60,0	15,0	4921	60	257,2	195,9	213,8	83,1	115,4	372,7	57,4
Octobre	2916	4092	4072	13,1	60,0	12,8	4921	60	270,1	178,4	192,2	71,2	122,6	392,7	49,0
Novembre	1621	2416	2387	8,9	60,0	10,7	4921	60	282,1	112,4	126,7	44,9	129,3	411,4	30,8
Décembre	1091	1590	1564	6,0	60,0	9,2	4921	60	290,4	75,0	92,5	31,8	133,9	424,3	21,8
Total An	1261,8 kWh/m ² /An	1366,0 kWh/m ² /An	1352,7 kWh/m ² /An	-	-	-	1796m ³ /An	-	99,3 MWh/An	61,4 MWh/An	67,9 MWh/An	-	45,1 MWh/An	144,4 MWh/An	-
Moyenne An	3457 Wh/m ² /jour	3742 Wh/m ² /jour	3706 Wh/m ² /jour	12,5°C	60,0°C	12,4°C	4921j/our	60°C	272 kWh/jour	168 kWh/jour	180 kWh/jour	68,4%	124 kWh/jour	396 kWh/jour	47,0%
Productivité Solaire Primaire: 615kWh/m ² /An										Productivité Solaire Utile: 680 kWh/m ² /An					

Figure 19 : Estimation de la production d'eau chaude sanitaire par des panneaux solaires thermiques (Source : Tecsol)

La surface totale du toit de chaque bâtiment ne peut pas être entièrement aménagée. Un coefficient un coefficient de 0.5 a été affecté à l'emprise foncière totale de la ZAC afin d'obtenir une surface exploitable maximale de toiture (53511 m²). Seule une partie de cette surface peut être exploitée à cause des ombres qui peuvent être créés et une orientation défavorable orientation des bâtiments.

A titre indicatif, si 5% des toitures sont dédiées à la cet usage, la production d'eau chaude sanitaire serait d'environ 1819 MWh/an, soit une couverture de plus de 100 % des besoins totaux en ECS de la ZAC.

Cependant, compte tenu du classement d'une partie du projet en site patrimonial remarquable, l'implantation de panneaux solaires n'est pas souhaitable en toiture.

3.1.2.3. Le solaire photovoltaïque

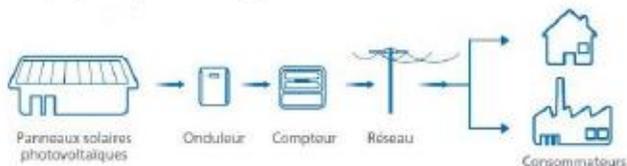
Le solaire photovoltaïque utilise le rayonnement solaire pour produire de l'électricité. La production peut être soit utilisée pour couvrir directement une partie des besoins en électricité des bâtiments sur lesquels sont positionnés les capteurs (système autonome), soit réinjectée dans le réseau (lorsque le système y est raccordé) ou encore stockée (système encore peu développé).



Figure 20 : Panneau photovoltaïque

Raccordée au réseau d'électricité, une installation photovoltaïque adaptée à un logement comprend :

- Les modules photovoltaïques ;
- Un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif ;
- Un compteur électrique qui comptabilise la production électrique vendue (sortie) ;
- Un compteur électrique qui comptabilise l'énergie consommée (entrée).



Selon les technologies disponibles, une simulation à l'aide du site Tecsol permet d'estimer la production d'énergie pour des capteurs solaires installés en toiture. Une modélisation a été réalisée en choisissant des modules photovoltaïques génériques en Silicium multicristallins. Les hypothèses retenues pour les simulations sont les suivantes :

- Surface de capteurs de 100 m² ;
- Orientation : 0° par rapport au sud ;
- Inclinaison : 30 ° par rapport à l'horizontale.

Les résultats de la simulation sont présentés ci-dessous :

Générateur photovoltaïque raccordé au réseau

Station Météo	Pau	
Latitude du lieu	43°22	
Modules PV	Générique Si multicristalin (Verre/Tedlar)	
	Puissance 172 Wc	Surface unitaire 1,5 m ²
Orientation	0 ° /Sud	
Inclinaison	30 ° /horizontale	
Surface utile	100 m ²	
Puissance crête	17,2 kWc	

Mois	Energie solaire reçue plan horizontal Wh/m ² .j	Energie solaire reçue plan des capteurs Wh/m ² .j	Electricité produite par le système kWh/mois
Janvier	1 536	2 302	920
Février	2 131	2 757	996
Mars	3 312	3 906	1 562
Avril	4 120	4 311	1 668
Mai	5 070	5 005	2 001
Juin	5 500	5 278	2 043
Juillet	5 628	5 476	2 190
Août	4 579	4 668	1 867
Septembre	3 895	4 427	1 713
Octobre	2 916	3 897	1 558
Novembre	1 621	2 255	873
Décembre	1 091	1 489	595
	Total énergie (kWh/an)		17 986
	Total CO2 évité (kg/an)(*)		6 475
	Productivité (kWh/kWc.an)		1 046

(*) 360g/kWh coefficient européen

Figure 21 : Estimation de la production d'énergie pour des capteurs solaires installés sur des toîts (Source : Tecsol)

Sur le site, 100 m² de panneaux solaires pourraient permettre de produire **17 986 kWh/an**.

L'emploi de panneaux photovoltaïques semble pertinent pour couvrir une partie des besoins en électricité de la ZAC, notamment pour les bureaux et les bâtiments tertiaires (hôtellerie).

Pour donner un ordre de grandeur, 5% des toitures dédiées à la production d'électricité via les panneaux photovoltaïques pourraient produire environ 321 MWh, soit près 7% des besoins de la ZAC.

Cependant, compte tenu du classement d'une partie du projet en site patrimonial remarquable, l'implantation de panneaux solaires n'est pas souhaitable en toiture.

3.1.2.4. Climatisation solaire

La climatisation solaire peut être utilisée pour les bâtiments tertiaires et les bureaux nécessitant la mise en place d'un système de rafraîchissement.

La climatisation thermique mobilise également des panneaux solaires. La différence avec le photovoltaïque est simple : les panneaux ne produisent pas d'électricité mais assimilent les calories du soleil. Ainsi, la chaleur est directement redistribuée dans le circuit de l'appareil pour faire monter la température du fluide caloporteur. Deux systèmes peuvent être utilisés :

- Un climatiseur à absorption renferme du bromure de lithium. Une fois la chaleur de l'air ambiant captée, le fluide de l'appareil se transforme en vapeur. Cette vapeur est ensuite enfermée dans le bloc absorbeur pour être condensée puis reprendre sa forme liquide sous l'action de la chaleur issue des panneaux solaires.
- Un climatiseur à adsorption ou dessiccation est constituée d'un adsorbant (gel de silicium) qui sert à refroidir la vapeur d'eau nécessaire au rafraîchissement de l'air. Là encore, les panneaux solaires apportent la chaleur nécessaire aux différents cycles d'évaporation et de condensation. C'est une méthode qui est plutôt utilisée pour climatiser des entrepôts et locaux professionnels.

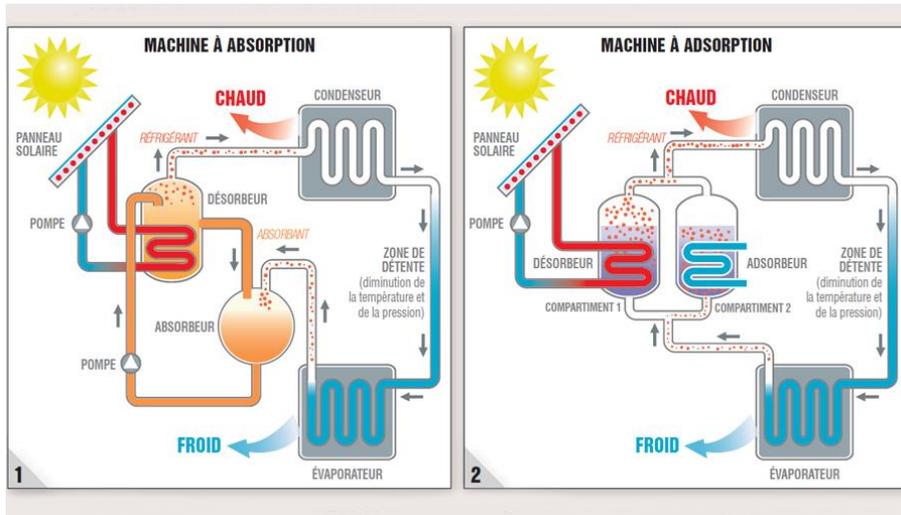


Figure 22: Type de climatiseur solaire thermique (Source : <https://mac1-clim.com/climatisation-solaire-a-energie-renouvelable/>)

En moyenne, Le COP (Coefficient de Performance) d'un climatiseur à absorption est d'environ 70 %. Il se définit comme le rapport de la puissance de froid, divisée par la puissance de chauffe nécessaire.

A titre indicatif, si 5% des toitures sont dédiées à cet usage, la production de froid serait d'environ 1274 MWh/an, soit une couverture de plus de 100 % des besoins totaux en climatisation de la ZAC.

3.2. ENERGIE GEOTHERMIQUE

La géothermie est l'exploitation de la chaleur du sous-sol, chaleur issue pour partie du refroidissement du noyau terrestre et principalement de la désintégration naturelle des éléments radioactifs contenus dans les roches profondes. Selon les régions, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte. Ce gradient géothermique varie en moyenne de 3 °C par 100 m à l'échelle de la Terre.

Afin de capter l'énergie géothermique, un fluide (nappe d'eau chaude captive naturelle ou eau injectée sous pression pour fracturer la roche) est mis en circulation à des profondeurs variables afin qu'il se réchauffe. Les calories obtenues après remontée du liquide peuvent par la suite être utilisées pour le chauffage, la climatisation ou pour produire de l'électricité.

Il existe trois types de géothermie selon différenciables selon la profondeur, la température ou encore l'utilisation de la ressource de chaleur :

- La géothermie de très faible à faible énergie (température inférieure à 90 °C),
- La géothermie de moyenne énergie (température supérieure à 90 °C),
- La géothermie de haute énergie (température supérieure à 120 °C).

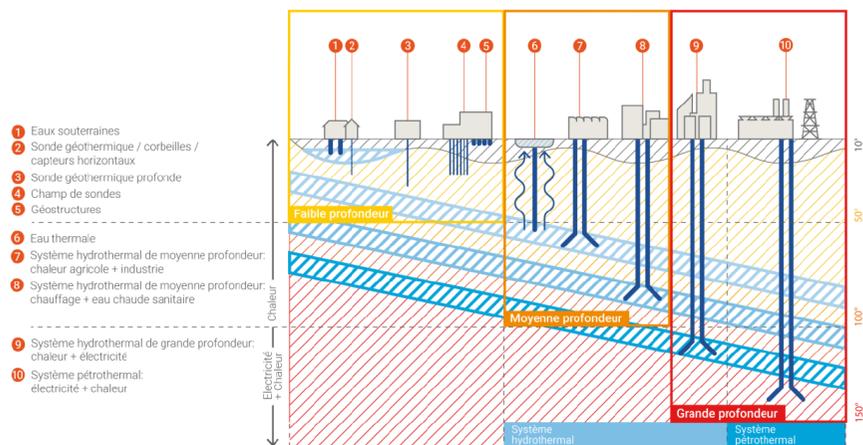


Figure 23 : Les différentes installations géothermiques

3.2.1. La géothermie profonde (moyenne énergie à haute énergie)

La géothermie de moyenne énergie concerne des projets plus profonds et des températures généralement supérieures à 90 °C. Elle est destinée à des usages thermiques tels que les utilisations industrielles et peut être utilisée pour la production d'électricité, voire les deux en même temps. Les usages principaux de ce type de géothermie sont industriels et comprennent l'extraction de produits chimiques, le séchage de produits industriels ou encore la récupération de métaux.

La géothermie de haute énergie cherche quant à elle à capter l'eau à des températures supérieures à 120 °C, sous forme de vapeur, qui servira à produire de l'électricité grâce à des turbines. Les réservoirs sont généralement localisés à des profondeurs se situant entre 1500 et 3000 mètres.

La géothermie profonde est une ressource intéressante qui pourrait être exploitée pour fournir le chauffage et l'eau chaude sanitaire. En effet, d'après le site Géothermies (anciennement Géothermie Perspectives), la ressource géothermale

profonde (> 200 m) des formations de l'Eocène au Jurassique moyen présente un potentiel moyen dans le secteur d'étude.

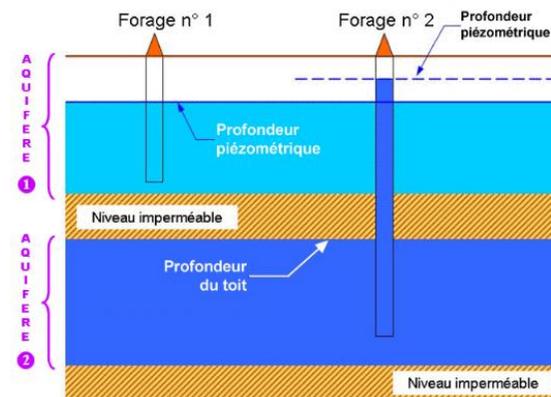
Ressource Géothermique sur la commune de : PAU (64445)

Positionnement du point sélectionné

X (RGF 93) : 426418 m
Y (RGF 93) : 6250238 m
X (Lambert 93) : 426418 m
Y (Lambert 93) : 6250237 m

Description au point sélectionné

Z (NGF) : 203.0 m



Aquifère	Toit (Côte NGF)	Mur (Côte NGF)	Piézométrie (Côte NGF)	Profondeur d'accès (m)	Température °C	Débit exploitable	Chimie	Ouvrage AEP (*)	Type d'aquifère	Potentiel TBE	Potentiel BE
liouquaternaire	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Non défini	Inconnue	Non	Non artésien	Potentiel inconnu	Potentiel inconnu
scène-inférieur	-792	-936	182	995	45	50 à 100	Inconnue	Non	Non artésien	Potentiel inconnu	Fort potentiel
Paléocène	-1561	-1634	171	1764	68	5 à 10	Inconnue	Non	Non artésien	Potentiel inconnu	Potentiel moyen
Tithonien	-9999	-9999	-9999	-9999	-9999	Non défini	Inconnue	Non	Non artésien	Potentiel inconnu	Potentiel inconnu

(*) Présence d'un captage exploitant la nappe pour l'alimentation en eau potable dans un rayon de 2km.

Figure 24 : Potentiel de la ressource géothermique profonde (>200m) sur la commune (Source :Géothermies)

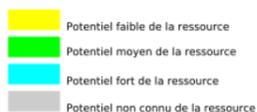
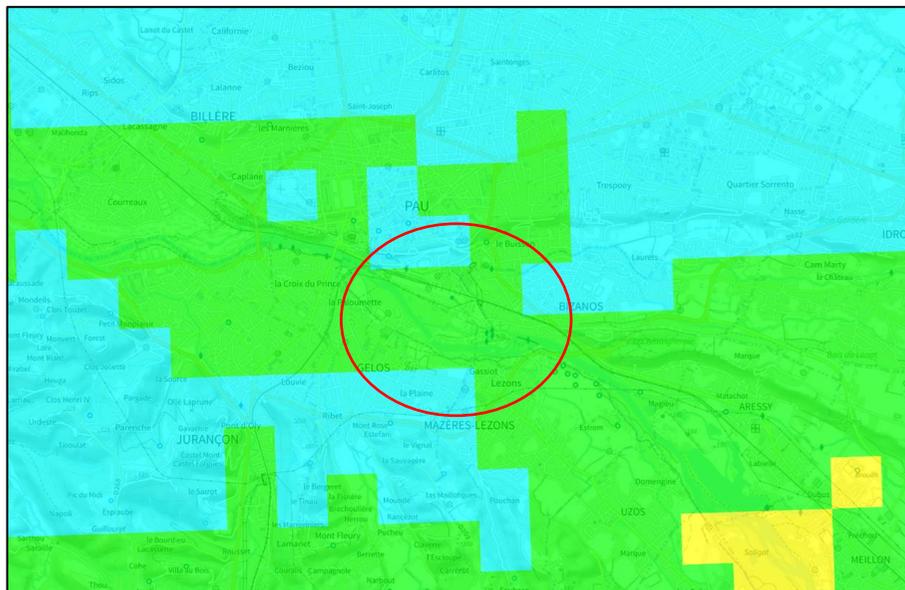


Figure 25 : Potentiel géothermie profonde au droit du projet (Source : Géothermies)

Le recours à la géothermie profonde nécessite des investissements importants et n'a pas été retenu dans le cadre du projet.

3.2.2. La géothermie de surface (très faible à faible énergie)

La géothermie de très faible à faible énergie consiste en l'extraction de l'énergie présente dans le sol (chaleur des roches du sous-sol, des nappes d'eau souterraine mais également d'autres ressources telles que les eaux usées...) située à des

profondeurs allant de quelques mètres jusqu'à environ 200 m. Les températures y sont généralement comprises entre 20°C et 50°C.

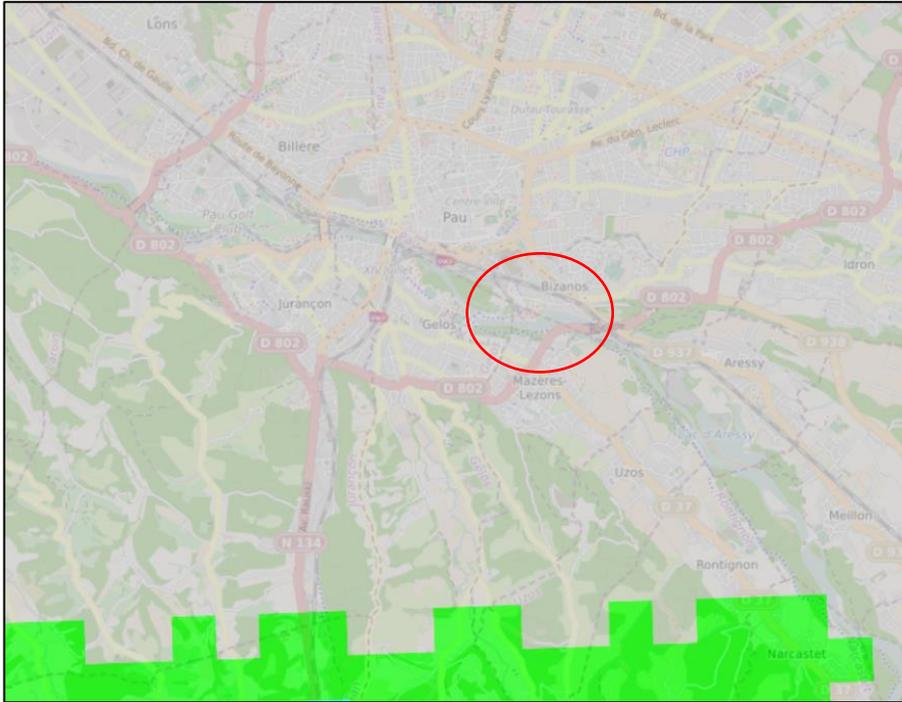
À ces profondeurs, la température du sol et des nappes d'eau (autour de 10 à 20 °C toute l'année) ne permet pas toujours une exploitation directe de cette énergie. Une pompe à chaleur (PAC) géothermique est donc utilisée pour restituer la chaleur, le froid ou le frais au niveau de température souhaité. On recense deux techniques en géothermie très basse énergie :

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

La géothermie de surface est adaptée à tous types de bâtiments (neuf, ancien, résidentiel, tertiaire, industriel ou agricole) et de toutes tailles (de la maison individuelle aux grands immeubles du tertiaire). Elle peut couvrir aussi bien des besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire que de rafraîchissement. Elle peut également servir dans des procédés industriels nécessitant de la chaleur, notamment dans le domaine agro-alimentaire.

Au droit du projet, le potentiel de la ressource géothermale de surface n'est pas connu.

Toutefois, une étude d'opportunité en géothermie a été menée par EGIS et une étude de faisabilité menée par AKAJOULE est en cours pour mettre en place (si avéré intéressant) une boucle tempérée sur nappe dans la partie nord du site et une géothermie sur sondes sur le reste du site.



RESSOURCES GÉOTHERMALES DE SURFACE SUR ÉCHANGEUR OUVERT (NAPPE) EN AQUITAINE

- Potentiel faible de la ressource
- Potentiel moyen de la ressource
- Potentiel fort de la ressource
- Potentiel non connu de la ressource

Figure 26 : Potentiel géothermie de surface au droit du projet (Source : Géothermies)

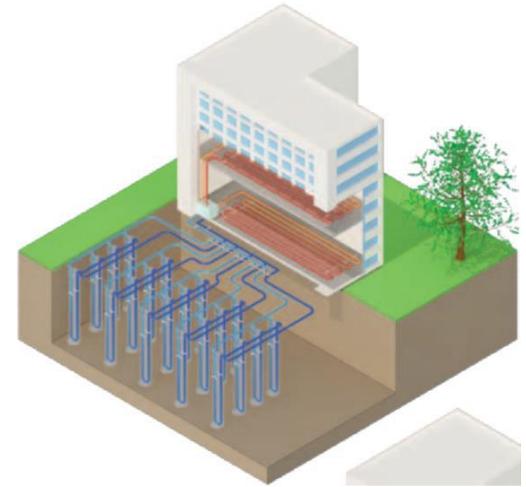
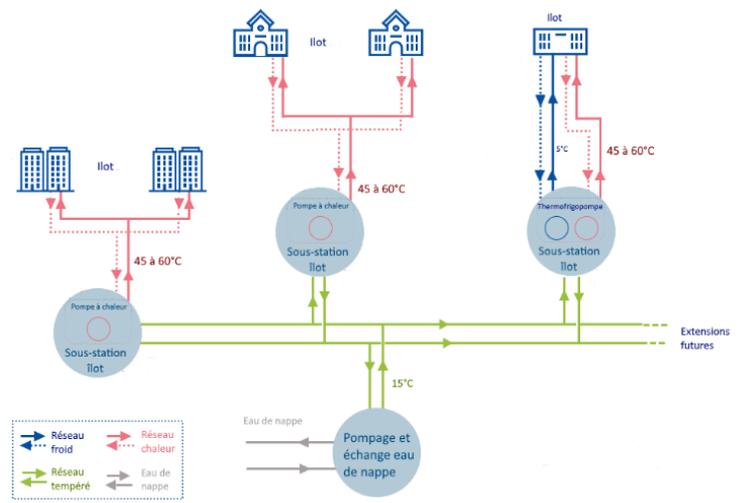


Figure 27 : Principe d'une boucle tempérée et d'un champs de sondes géothermiques

La validation du potentiel géothermique de surface nécessite des investigations et recherches plus fines que celles réalisées dans le cadre de l'étude du potentiel ENR et l'avis d'un expert sur la possibilité de mettre en place un ouvrage de géothermie sur le site.

Une étude de faisabilité menée par AKAJOULE est en cours pour mettre en place une boucle tempérée sur nappe et une géothermie sur sondes. La ressource géothermique mobilisée permettra de répondre aux besoins de chaleur et de climatisation.

3.3. L'AÉROTHERMIE

Le principe de l'aérothermie est de capter les calories dans l'air extérieur. De la même manière que pour la géothermie très basse énergie, le puisage des calories de l'air à travers un ventilateur nécessite l'utilisation d'un système de pompes à chaleur. A noter que les pompes à chaleurs peuvent soit être utiliser pour le chauffage, soit pour le chauffage et l'ECS, soit enfin pour l'ECS seule (on parle dans ce cas de ballon thermodynamique, la pompe à chaleur étant intégrée au ballon d'eau chaude).

Il existe plusieurs types de pompes à chaleurs (ou PAC) aérothermiques. La PAC air/air récupère l'air en extérieur, le chauffe, puis l'insuffle à l'intérieur de la maison via des ventilo-convecteurs. La PAC air/eau récupère l'air extérieur pour chauffer l'eau sanitaire, le plancher chauffant, les radiateurs, etc. Ces pompes à chaleur fonctionnent pour réchauffer, mais également pour refroidir. C'est pourquoi elles sont utiles aussi bien en été (climatiseur) qu'en hiver (chauffage).



Figure 28 : Fonctionnement Aérothermie Air / Eau (Source : <https://guide.devisconseil.com/pompe-chaleur/aerothermie-air-eau>)

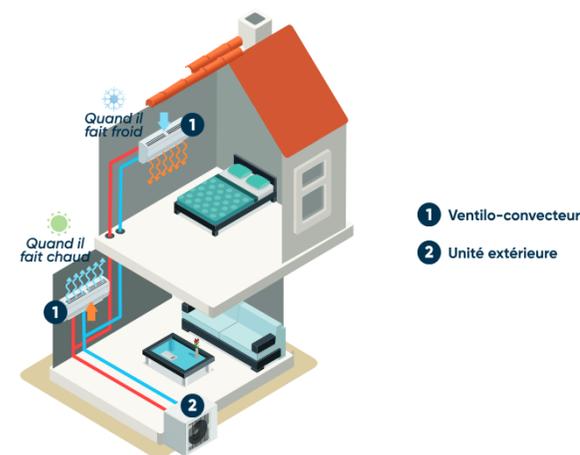


Figure 29 : Fonctionnement d'une pompe à chaleur air air réversible (Source : <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/pompe-chaleur-air-air>)

Si les investissements sont inférieurs à la géothermie (pas de forage), le coefficient de performance du système est globalement moins bons. En effet, la fluctuation des températures de l'air extérieur influence la performance des systèmes de pompes à chaleur. Par temps froid, les besoins de chauffage sont maximums alors que la quantité d'énergie pouvant être extraite dans l'air est à contrario minimale, d'où une baisse de la performance. Dans les cas extrêmes, le COP (rapport de l'énergie thermique obtenue sur l'énergie électrique dépensée) tend vers 1 et le système s'approche des performances d'un radiateur électrique à convection classique. Les pompes à chaleur air-air ont généralement un COP de 3 et une puissance comprise entre 2 et 20 kW.

Dans le cas du projet, en raison des besoins de climatisation des bâtiments tertiaires et des bureaux, l'emploi d'une pompe à chaleur air/air peut s'avérer pertinent.

A titre indicatif, le fonctionnement d'une PAC air air de 6 kW 3 mois dans l'année, soit 2 160 h permet de produire environ 39 MWh/an.

3.4. LA BIOMASSE

3.4.1. Le gisement biomasse

La biomasse correspond à la fraction biodégradable :

- Des produits déchets, résidus provenant de l'**agriculture**, y compris les substances végétales et animales,
- Des produits déchets, résidus provenant de la **sylviculture**, et des industries connexes,
- Des déchets et résidus végétaux de l'**industrie** (bois, issu de l'exploitation forestière, déchets organiques des industries agro-alimentaires...).

La biomasse mobilisable pour être exploitée sous forme de biogaz, de vapeur, chaleur ou de biocarburant provient de multiples sources. Les principales sont décrites dans le schéma présenté ci-après.

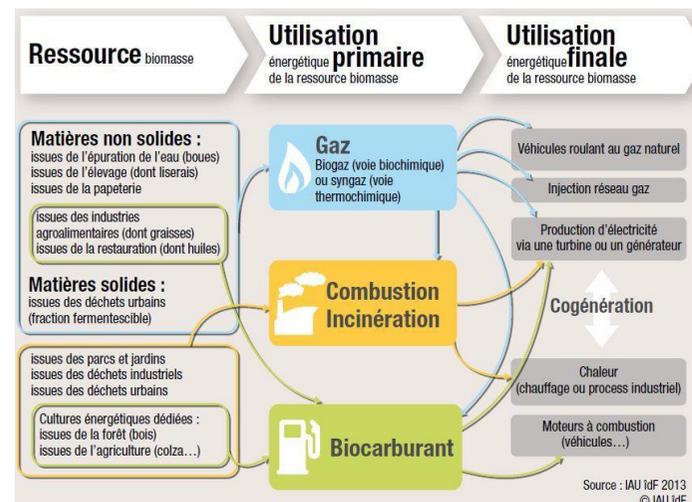


Figure 30 : Matières mobilisables pour la biomasse (Source : ADEME)

Le choix de valoriser la ressource biomasse doit se faire en tenant compte de la distance à parcourir pour aller la chercher. Au-delà d'une distance de 150 km autour du projet, les coûts et les émissions engendrées par le transport ne feront pas de cette solution, une option viable aussi bien économiquement qu'écologiquement.

3.4.2. Le bois énergie

L'appellation « bois-énergie » désigne l'utilisation du bois à des fins énergétiques, pour produire principalement de la chaleur et de l'électricité après transformation. Il peut être d'origine forestière (sylviculture), bocagère, industrielle, paysagère, etc.

Le bois énergie peut être utilisée :

- A l'échelle du quartier, grâce une chaufferie collective et un réseau de chaleur : la combustion du bois est faite dans une chaufferie collective. L'énergie est ensuite transportée vers les différents bâtiments via un réseau de chaleur urbain,
- A l'échelle du bâtiment (immeuble collectif ou maisons individuelles).

Le bois énergie est considéré comme une énergie renouvelable, à condition que le stock prélevé chaque année soit reconstitué. Le bois énergie est donc une énergie renouvelable mais limitée. Elle doit donc être utilisée de manière efficace avec des systèmes performants. A ce titre, il peut être plus pertinent de développer le bois énergie grâce à un système collectif comme les réseaux de chaleur, car la mise en place de systèmes collectifs peut permettre d'utiliser des systèmes plus efficaces et de mieux gérer les contraintes (pollution atmosphérique liée à la combustion du bois, livraison de bois).

3.4.3. Gisement au droit du secteur d'étude

Sources : <https://www.laforetbouge.fr/nouvelleaquitaine/les-forets-de-notre-region> , Schéma régional biomasse Nouvelle-Aquitaine

Il n'existe pas de ressource forestière ou d'industrie bois au droit du projet ou dans son environnement proche. Cette ressource pourrait tout de même être recherchée à l'échelle régionale.

La région Nouvelle-Aquitaine dispose d'un massif forestier important de l'ordre de 2,8 millions d'hectares, soit 17 % de la forêt nationale. Les forêts occupent 34 % de la surface de la région. La forêt régionale fournit près de **10 millions de m³** de bois chaque année et représente 26 % de la récolte française. Elle se répartie de la façon suivante :

- Bois d'œuvre : 51%
- Bois d'industrie : 38%

■ Bois énergie : 11%

Il en résulterait donc une disponibilité de **1 100 000 m³** par an.

La mise en place d'une unité de cogénération associée à une chaudière à base de bois énergie peut s'avérer intéressant. En effet, ce type d'installation de production énergétique présente le net avantage de couvrir à la fois des besoins thermiques et électriques. Les besoins électriques représentant un poste majeur de demande énergétique, l'intérêt de la solution de cogénération est donc fort, notamment en raison de la demande en électricité des certaines typologies de bâtiments type surface d'activités.

Dans le cas de la valorisation de 1 % de cette ressource, par une chaudière à cogénération (production simultanée de chaud et d'électricité avec un rendement moyen de 75 %), il est envisageable de produire annuellement environ 4950 MWh/an thermiques (chauffage et ECS) et 2475 MWh/an électriques. Cela représente respectivement 45% et 52% des besoins thermiques et électriques du projet.

Cette ressource présente néanmoins trois contraintes :

- Elle nécessite le transport de la ressource entre le lieu de production et le lieu de combustion. En considérant un chargement moyen d'un camion semi-remorque de 25 tonnes, l'approvisionnement du site pour le chaud et l'électricité nécessiterait près de **132 rotations de camions par an**. Ce trafic routier constitue une gêne potentielle pour les riverains (nuisances sonores, encombrement du trafic).
- Les chaudières biomasse dans les logements collectifs nécessitent un espace dédié pour leur installation. Il est essentiel de prévoir un local technique suffisamment grand pour accueillir la chaudière, le silo de stockage de biomasse et les équipements connexes.
- La combustion de biomasse est émettrice de particules, ce qui impacte la qualité de l'air. Cette problématique est aujourd'hui globalement maîtrisée, notamment sur les installations collectives et récentes et les équipements actuels permettent de respecter les normes de qualité de l'air.

En conclusion, le bois énergie présente un potentiel important permettant de mobiliser une ressource régionale.

Compte-tenu du fait que le quartier « Rives du Gaves » ne soit actuellement pas raccordé au réseau de chaleur urbain de la Pau, la solution « chaudière biomasse collective avec réseau de chaleur » n'est pas retenue bien que le réseau soit actuellement en partie alimentée par la chaufferie biomasse de Lons. Il est plutôt envisagé la mise en place de chaudière biomasse d'immeuble, notamment dans les logements collectifs, avec cogénération. Cependant, l'espace nécessaire à l'installation des chaudières et au stockage de la biomasse doit être considérée.

3.5. LE BIOGAZ

Le biogaz est un gaz issu de la fermentation de matières organiques animales ou végétales. Une fois récupéré, il peut être valorisé sous forme de chaleur et/ou d'électricité grâce à une chaudière à cogénération (ou chaudière classique).

Il existe deux techniques de production existant : la méthanisation ou la récupération sur centre d'enfouissement technique. Seule la méthanisation dans un digesteur semble adaptée aux contraintes d'un projet d'aménagement urbain.

Un habitant français moyen génère chaque année environ 350 kg soit un gisement en énergie de près de 250kWh/an/personne. Cependant, les coûts d'investissement et les coûts de fonctionnement pour la collecte spécifique des déchets à méthaniser rendent ces opérations difficilement rentables. De plus, les déchets issus du quartier feront probablement l'objet de valorisation au niveau de la communauté d'agglomération. En effet, à l'heure actuelle la production d'eau chaude du réseau de chaleur de Pau s'appuie en partie sur la chaleur fatale issue de l'incinérateur de déchets ménagers de Lescar.

Au regard des éléments supra, cette solution n'a pas été retenue.

3.6. RESEAU DE CHALEUR

Le réseau de chaleur urbain existant et programmé sur Pau s'appuie sur le mix énergétique suivant :

- La chaleur fatale issue de l'incinérateur de Lescar,
- L'énergie locale et renouvelable de la chaufferie biomasse de Lons, aussi équipée d'une chaudière gaz en secours,
- La chaufferie gaz, située sur le site de l'UPPA, intervient en appoint en cas de rigueur climatique ou en secours lors des phases de maintenance sur la chaufferie située à Lons.

PLAN DU RÉSEAU DE CHALEUR DE PAU BÉARN PYRÉNÉES

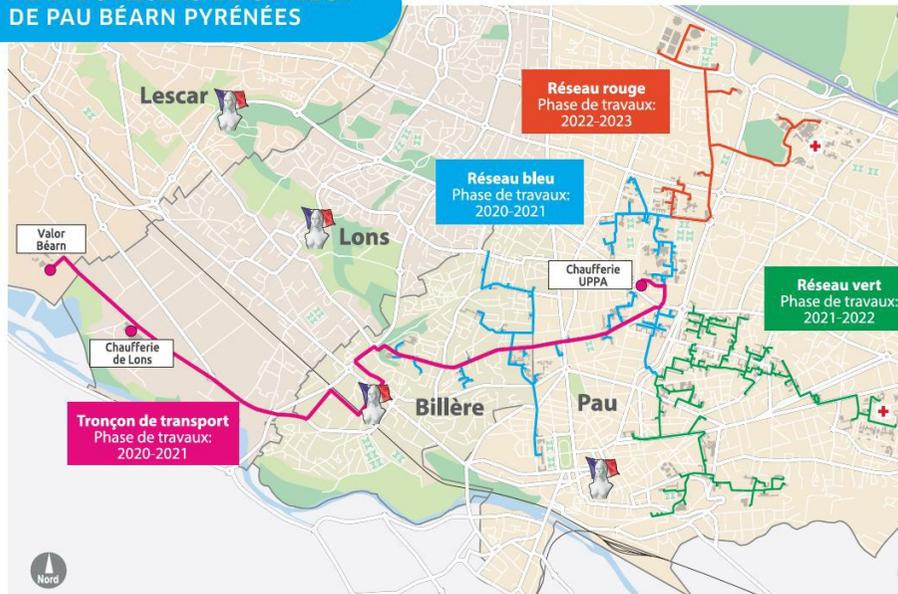


Figure 31 : Plan du réseau de chaleur urbain existant et programmé sur l'agglomération

Ce réseau se situe au nord du quartier étudié, et peut difficilement être étendu au quartier, du fait de contraintes topographiques et hydrologiques notamment (fort dénivelé, ruisseau de l'Ousse, ...), ainsi que de capacités de la chaufferie actuelle.

Comme mentionné précédemment, une étude de mise en place d'un réseau de chaleur urbain spécifique au quartier utilisant la géothermie est en cours d'étude.

Compte-tenu de ces éléments, cette solution ne sera pas traitée dans la suite du document.

3.7. ENERGIE EOLIENNE

3.7.1. Valorisation de l'énergie

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. L'énergie cinétique du vent peu par la suite être utilisée pour produire de l'électricité. Pour ce faire, l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour créer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Deux familles d'éoliennes existent : les éoliennes terrestres dites « onshore » qui sont installées à terre et les éoliennes dites « offshore » qui sont installées en mer.

Les éoliennes sont également réparties par typologies :

- Les éoliennes industrielles : il s'agit des grands parcs éoliens (ou « fermes éoliennes ») raccordés au réseau électrique ;
- Les éoliennes domestiques : il s'agit de petites éoliennes installées chez les particuliers. En moyenne, la puissance est de 5 kW et la hauteur des mâts, de 10 à 12 m.

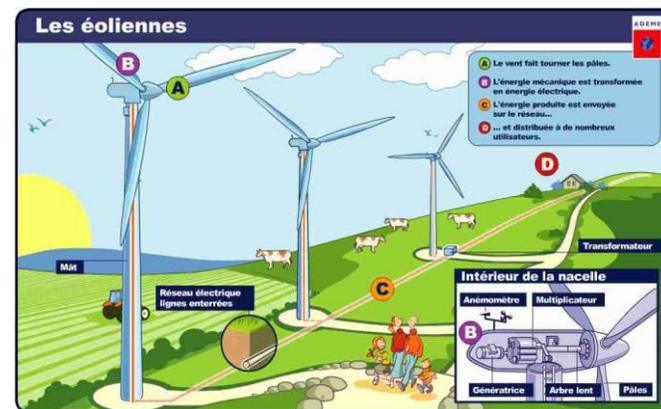


Figure 32 : Principe de fonctionnement des éoliennes



Figure 33 :Eolien individuel

3.7.2. Gisement au droit du secteur d'étude

La station météorologique Aéroport Pau-Pyrénées informe sur la distribution annuelle du vent sur la commune de Pau. Les observations réalisées entre 07/2002 et 12/2023 reflètent une dominance des vents en provenance d'ouest au nord-ouest.

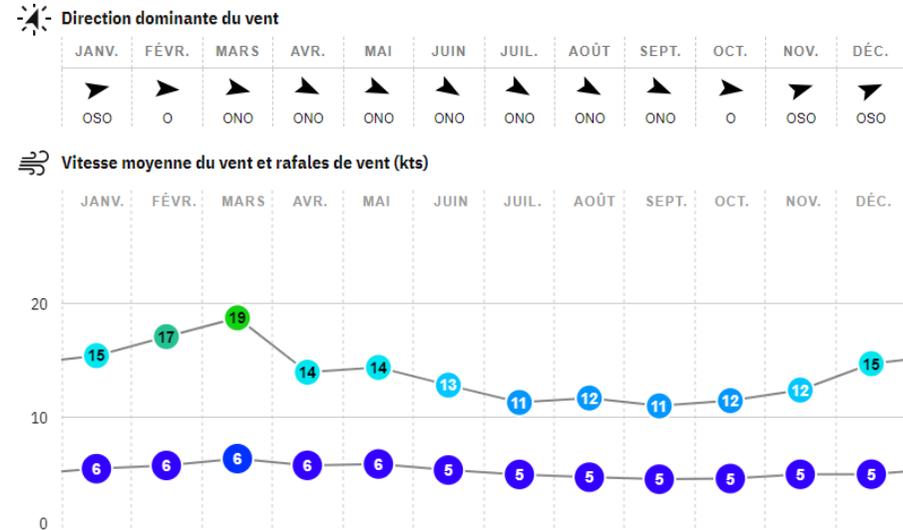


Figure 34 : Statistiques mensuelles sur la vitesse et la direction du vent pour Aéroport Pau-Pyrénées (Source : Winfinder))

La DREAL Nouvelle Aquitaine a cartographié les secteurs potentiellement favorables au développement de l'éolien terrestre. La commune de Pau, du fait de sa localisation, n'est pas identifiée comme une commune présentant des potentialités intéressantes.

De plus, compte tenu des vitesses de vents plutôt faibles et de la présence d'obstacles pour le passage du vent (proximité d'immeubles) le site n'est pas adapté à l'implantation d'éoliennes urbaines.

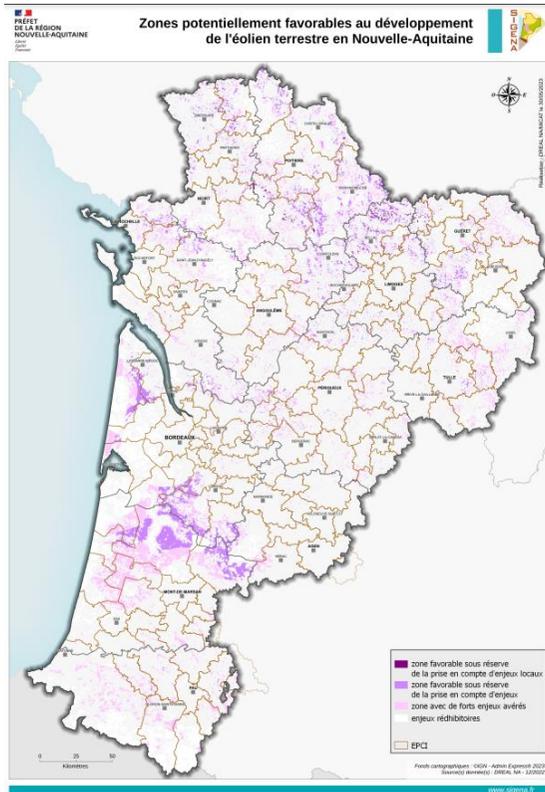


Figure 35 : Zones potentiellement favorables au développement de l'éolien terrestre (Source : SIGENA)

Les contraintes urbaines du site (site urbanisé non propice au développement de l'énergie éolienne) et paysagères (Gave de Pau, vue dégagée depuis Pau sur les Pyrénées) de la zone d'implantation du projet ne permettent pas d'envisager cette ressource renouvelable.

3.8. RECUPERATION DE LA CHALEUR DES EAUX GRISES

A l'échelle d'un bâtiment, il est possible de récupérer la chaleur provenant des eaux grises (eaux faiblement polluées, par exemple eau d'évacuation d'une douche, d'un lavabo) à l'aide d'un échangeur et d'une pompe à chaleur.

En générale, ces eaux ont une température d'environ 20°C en été et de 12 à 15 °C l'hiver. Le potentiel thermique des eaux usées est en tous cas bien adapté aux besoins des bâtiments collectifs. Les projets d'investissement peuvent être accompagnés par les directions régionales de l'ADEME en termes de conseils, d'expertise ou de soutiens financiers.

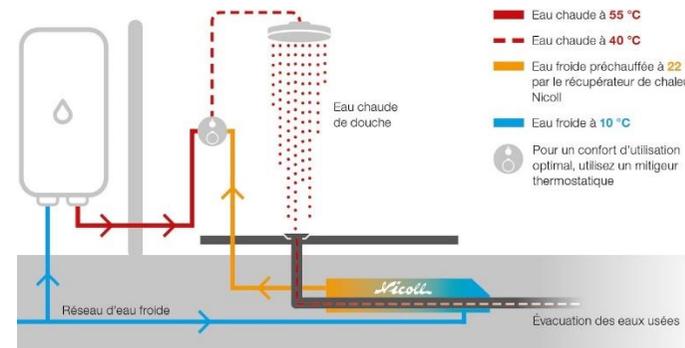


Figure 36 : Schéma de fonctionnement

En moyenne, il est possible de récupérer 20 % de l'énergie par rapport à la consommation initiale.

La récupération de la chaleur des eaux grises pourrait être intéressantes pour préchauffer l'eau contenue dans les ballons de production d'ECS notamment au sein des logements collectifs.

Les besoins d'ECS étant estimés à environ 1955 MWh/an pour l'ensemble de la programmation, ce gisement représente un potentiel de 391 MWh/an.

4. SCENARIIS ENERGETIQUES RETENUS

4.1. GENERALITES

Au regard de l'analyse des besoins du projet, et de l'analyse du potentiel en énergies renouvelables, les énergies mobilisables sont :

- Le solaire (photovoltaïque et thermique),
- La géothermie de surface (fait l'objet d'études complémentaires),
- La biomasse (à travers le bois énergie),
- L'aérothermie par le biais de pompes à chaleur,
- Les eaux grises.

Les scénarios d'approvisionnement suivants ont été retenus :

- Scénario 1-Electrique : Il s'agit d'un scénario classique d'alimentation. Il sert de base pour la comparaison avec les autres scénarios en termes de bilan économique et environnemental.
- Scénario 2-Biomasse et ballon thermodynamique : Il s'agit d'un scénario reposant sur l'utilisation de chaudières collectives biomasse avec cogénération pour le chauffage et l'électricité. Le ballon thermodynamique assurera quant à lui les besoins en ECS.
- Scénario 3-Solaire thermique : Ce scénario repose sur l'utilisation de panneaux solaires thermiques afin de répondre aux besoins ECS dans les logements collectifs et les bâtiments du secteur tertiaires/hôtellerie.

- Scénario 4 –Récupération des eaux grises: Ce scénario met l'accent sur la production d'une partie de l'ECS à partir de la récupération des eaux grises des bâtiments résidentiels (collectif), tertiaires et commerces.

4.2. DESCRIPTION DES SCENARIIS

4.2.1. Scénario 1

Pour les logements collectifs et les bâtiments tertiaires/ hôtellerie, une chaudière gaz collective permettra d'assurer les besoins en chauffage et en ECS. Concernant les bureaux et les commerces, les besoins en chauffage et en froid sont assurés par PAC aérothermique air air, tandis que les besoins en ECS sont approvisionnés par des ballons électriques. Enfin, l'ensemble des besoins d'électricité est assuré par le réseau électrique national.

Chauffage	ECS	Climatisation	Usages spécifiques électricité (Eclairage, ventilation, auxiliaires)
Logements collectifs, tertiaire/hôtellerie : gaz	Logements collectifs, tertiaire/hôtellerie : gaz	Logements : -	Réseau national
Bureaux, commerce : PAC air air	Bureaux, commerce : ballon électrique	Bureaux, tertiaire/hôtellerie, commerce : PAC air air	

4.2.2. Scénario 2

Dans ce scénario, les logements collectifs sont alimentés en chauffage par une chaudière biomasse avec cogénération compte-tenu de leur forte demande. L'eau chaude sanitaire est assurée par un ballon thermodynamique.

Les commerces et les bureaux sont alimentés en chauffage et froid grâce à une PAC air air.

Chauffage	ECS	Climatisation	Usages spécifiques électricité (Eclairage, ventilation, auxiliaires)
Logements collectifs, tertiaire Biomasse bois énergie	Logements collectifs: Ballon thermodynamique	Logements :-	Logements collectifs: Biomasse bois énergie + réseau national
Tertiaire, bureaux, commerce : PAC air air	Bureaux, tertiaire, commerce : ballon électrique	Bureaux, commerce, tertiaire/hôtellerie : PAC air air	Réseau national

4.2.3. Scénario 3

L'intérêt de ce scénario est d'analyser la pertinence d'installer des panneaux solaires thermiques afin de répondre à 70 % des besoins en ECS des logements résidentiels et des bâtiments tertiaires (la production étant très forte en été, et assez faible en hiver). La chaudière à gaz couvrira l'ensemble des besoins de chauffage et 30 % des besoins en ECS.

Chauffage	ECS	Climatisation	Usages spécifiques électricité (Eclairage, ventilation, auxiliaires)
Logements collectifs, tertiaire/hôtellerie : gaz	Logements collectifs, tertiaire/hôtellerie : solaire thermique+ gaz	Logements :-	Réseau national
Bureaux, commerce : PAC air air	Bureaux, commerce : ballon électrique	Bureaux, commerce, tertiaire/hôtellerie : PAC air air	

4.2.4. Scénario 4

Ce scénario prévoit la production d'ECS dans les logements collectifs grâce à une pompe à chaleur air-eau. Elle assurera 80 % des besoins de chauffage et d'ECS. L'appoint/secours de la production d'ECS est assurée par une chaudière gaz, notamment lors des fortes demandes en hiver (20%). Le chauffage est assuré grâce à des chaudières au gaz naturel en pied d'immeuble.

La production de chaleur et de froid dans les bureaux et les commerces est assurée par des pompes à chaleur aérothermiques réversibles.

Chauffage	ECS	Climatisation	Usages spécifiques électricité (Eclairage, ventilation, auxiliaires)
Logements collectifs, tertiaire/hôtellerie : PAC air eau + gaz	Logements collectifs, tertiaire/hôtellerie : PAC air eau + gaz	Logements :-	Réseau national
Bureaux, commerce : PAC air air	Bureaux, commerce : ballon électrique	Bureaux, commerce, tertiaire/hôtellerie : PAC air air	

Des hypothèses ont été prises sur les profils de consommation des appareils pour estimer les puissances à mettre en œuvre. Cette première estimation ne remplace pas les études de dimensionnement à réaliser en phase de conception. En effet, la consommation varie en fonction de paramètres climatiques (température extérieure, apports solaires) et de l'usage (occupation des bâtiments, utilisation des équipements, etc.).

Par exemple, pour une installation de chauffage fonctionnant environ 6 400 heures au cours de l'année, la lecture de sa courbe de charge montre que le régime de fonctionnement varie fortement et n'est réellement élevé que durant 1 000 heures environ. Le maximum atteint est la puissance utile à installer.

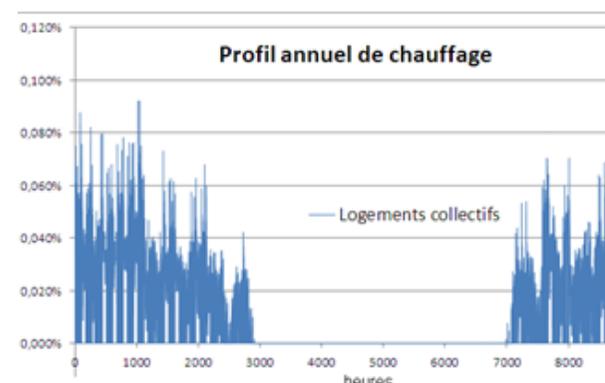


Figure 37 : Exemple de profil annuel de consommation en chauffage d'un logement collectif

5. ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE

L'étude d'opportunité permet la comparaison de différentes solutions sur la base des coûts d'investissement et des émissions de gaz à effet de serre.

5.1. DIMENSIONNEMENT TECHNIQUE

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

	Puissance Chauffage (kW)	Puissance Climatisation (kW)	Puissance ECS(kW)	Puissance Usages spécifiques électricité (Eclairage)
Logement collectifs	3658	189	83	580
Bureaux	704	1918	42	409
Tertiaires/hôtellerie	2339	5495	906	1876
Commerce	315	609	42	153

Figure 38 : Puissances estimées

5.2. COUTS D'INVESTISSEMENTS

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

Scénario	Equipement pris en compte	Investissement en K euros HT
Scénario 1	Achat et installation chaudières gaz Achat et installation pompes à chaleur aérothermiques réversibles Achat et installation ballon électrique	27266
Scénario 2	Achat et installation chaudière biomasse Achat et installation ballon thermodynamique Achat et installation ballon électrique Achat et installation pompes à chaleur aérothermiques réversibles	30051
Scénario 3	Achat panneau solaire thermique Achat et installation chaudières gaz Achat et installation pompes à chaleur aérothermiques réversibles Achat et installation ballon électrique	16691
Scénario 4	Achat et installation PAC aérothermique air/eau Achat et installation chaudières gaz Achat et installation pompes à chaleur aérothermiques réversibles Achat et installation ballon électrique	24769

5.3. EMISSIONS DE CO2

Une estimation des émissions de gaz à effet de serre de chaque scénario a été calculée sur la base des consommations de chaud (chauffage et ECS) et de froid.

Pour ce faire, les facteurs d'émissions de CO2 pris en considération sont les suivants :

Energie	Facteur d'émission en 2019 (g CO2/kWh)
Gaz naturel	227
Plaquette bois/granulé	30
Electricité	57

Comme pour tous les combustibles fossiles, le facteur d'émission du gaz est très important. Ainsi, les solutions 1 et 3 ayant recours à un pourcentage plus élevé de cette source d'énergie pour la production de chaud sont donc naturellement les plus émettrices de CO₂.

Les moins émettrices sont, quant à elles, celles qui utilisent des ressources renouvelables telles que le bois ou l'aérothermie.

Pour l'ensemble des scénarii, l'utilisation de pompe aérothermique pour la production de froid permet de diminuer la consommation énergétique et donc les émissions de gaz à effet de serre.

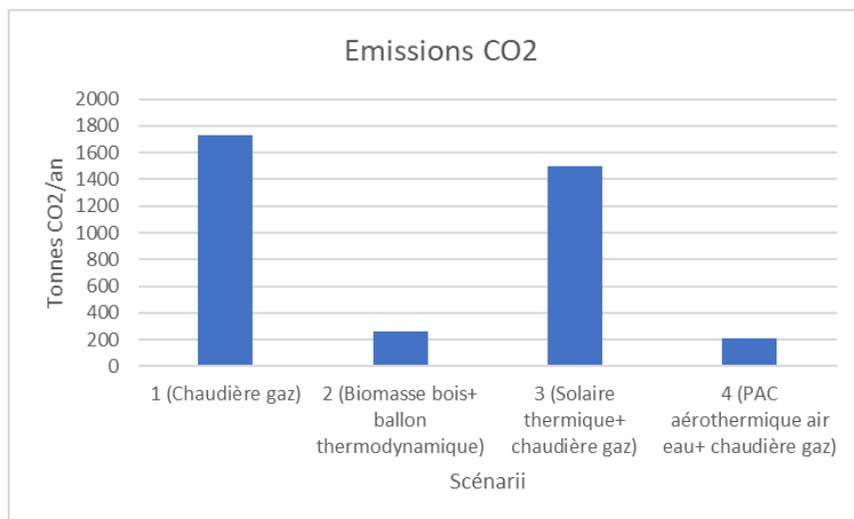


Figure 39 : Emissions de CO₂/an



