

**CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE
DE RENNES *PONTCHAILLOU***



**CONSTRUCTION D'UN CENTRE
CHIRURGICAL & INTERVENTIONNEL**



PC11.6

ETUDE D'IMPACT
ETUDE DE POTENTIEL EN ENERGIES RENOUVELABLES

NCH

PROJET

PCI

PHASE

CHU

EMETTEUR

—

N° LOT

EIE

DISCIPLINE

DETU

TYPE

TZS

ZONE

TN

NIVEAU

0006

NUMERO

A

INDICE

DOSSIER DE PERMIS DE CONSTRUIRE

JUIN 2020

ETUDE DE POTENTIEL EN ENERGIES RENOUVELABLES

MODERNISATION ET RECONSTRUCTION DU CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE DE RENNES (35)

CHU Rennes

Juin 2020



SOMMAIRE

1. Description et contexte du projet	3
1.1 Contexte politique	3
1.1.1 Des enjeux internationaux à intégrer localement.....	3
1.1.2 Un cadre réglementaire structurant	3
Développement de la production électrique à partir d'EnR en France – Source : DREAL Grand-Est	3
1.2 Contexte du site	5
1.2.1 Localisation du site	5
1.2.2 Le climat	6
1.2.3 Topographie	7
1.2.4 Desserte énergétique actuelle du site.....	7
1.2.5 Consommations énergétiques du site.....	10
1.2.6 Programmation et organisation spatiale du projet.....	10
1.2.7 Les besoins énergétiques associés	16
2. Potentiel de développement des énergies renouvelables	22
2.1 L'énergie solaire	22
2.1.1 Solaire passif.....	22
2.1.2 Solaire thermique	22
2.1.3 La climatisation solaire	23
2.1.4 Le solaire photovoltaïque	24
2.2 L'énergie éolienne	27
2.2.1 Le grand éolien et le petit éolien.....	27
2.2.2 L'éolien urbain	27
2.2.3 Potentiel éolien local	28
2.3 L'énergie géothermique	29

2.3.1 Haute énergie.....	29
2.3.2 Basse énergie	30
2.3.3 Très basse énergie	30
2.4 La biomasse.....	33
2.4.1 Le gisement biomasse	33
2.4.2 Bois-énergie	33
2.4.3 Le bois énergie – cogénération	34
2.4.4 Ressource forestière	34
2.4.5 Le bois déchet	34
2.4.6 Approvisionnement	35
2.5 La récupération de chaleur des eaux domestiques	36
2.5.1 Récupération de chaleur sur les eaux grises.....	36
2.5.2 Récupération de chaleur sur les eaux usées.....	36
2.5.3 Récupération de chaleur fatale industrielle (ou data center)	37
2.6 Les autres technologies existantes	38
2.6.1 Le biogaz et les biocarburants	38
2.6.2 Aérothermie.....	39
2.6.3 L'énergie hydrolienne	39
2.6.4 Les réseaux de chaleur	39
2.7 Synthèse.....	41
3. PRE-DIMENSIONNEMENT ET SCENARII	44
3.1 Définition des scenarii d'approvisionnement	44
3.1.1 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque	44
3.1.2 Hypothèses pour l'analyse	44
3.2 Analyse économique.....	46
3.3 Analyse environnementale	50
4. CONCLUSION.....	51

1. Description et contexte du projet

La présente « Etude du potentiel de développement des énergies renouvelables » a été réalisée conformément à l'art. L128-4 du Code de l'urbanisme.

1.1 Contexte politique

1.1.1 Des enjeux internationaux à intégrer localement

A l'heure où les questions énergétiques et climatiques deviennent des enjeux majeurs à l'échelle planétaire, leur gestion représente un véritable défi. Le réchauffement climatique et la raréfaction des ressources naturelles, notamment fossiles, sont aujourd'hui, de réelles problématiques qui nécessitent la mise en place d'actions concrètes et durables. Au fur et à mesure de la prise de conscience de ces enjeux, les pouvoirs publics ont instauré des objectifs à atteindre afin de permettre l'atténuation de ces phénomènes. Ces ambitions, définies à différentes échelles d'intervention (mondiale, nationale, régionale, communale...), se sont vues déclinées en stratégies contextualisées à chaque territoire à travers notamment, l'adoption de lois cadres et l'élaboration de documents de planification. Le projet de reconstruction de l'Hôpital Pontchaillou de Rennes est à ce titre soumis à des exigences environnementales. Concerné notamment par le Grenelle de l'environnement à l'échelle nationale, il doit également répondre aux ambitions régionales et locales qui ont fait de la politique énergétique une politique prioritaire.

1.1.2 Un cadre réglementaire structurant

Depuis le sommet de Rio de 1992, les réglementations visant à diminuer les consommations énergétiques et à développer les énergies renouvelables se sont multipliées, incitant les différents acteurs (publics et privés) et les citoyens à entreprendre et développer des actions concrètes sur leur territoire. A l'échelle nationale, la loi de programme applicable sur le territoire français découle de la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement. Définitivement adoptée le 3 août 2009, elle « fixe les objectifs, définit le cadre d'action, organise la gouvernance à long terme et énonce les instruments de la politique mise en œuvre pour lutter contre le changement climatique ». En matière énergétique, elle confirme les engagements précédents, notamment concernant le facteur 4 à l'horizon 2012, la part de 23% des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en 2020, la réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre dans les transports, la consommation maximale de 50 kWh/m².an en 2013 (bâtiment à énergie positive en 2020) et la baisse d'au moins 38% des consommations énergétiques dans les bâtiments existants d'ici 2020. La loi Grenelle 2, adoptée le 12 juillet 2010 complète quant à elle, la loi Grenelle 1, en définissant les mesures à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs fixés précédemment.

Ces objectifs ont été confortés récemment par de nouvelles cibles l'horizon 2030.

D'une part, l'Union européenne a décidé, dans son nouveau Paquet Énergie-Climat 2030, d'atteindre à cette date 27 % d'énergies renouvelables dans son bouquet énergétique. D'autre part, la France a inscrit, dans la loi du 17 août 2015, relative à la transition énergétique pour la croissance verte, l'objectif de porter la part des énergies renouvelables dans sa consommation brute d'énergie à 32 % en 2030.

Par ailleurs, dans l'attente de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), l'arrêté du 24 avril 2016 relatif aux objectifs de développement des énergies renouvelables modifie les programmations pluriannuelles des investissements de production d'électricité et de chaleur en fixant de nouveaux objectifs, à horizon du 31 décembre 2018 et du 31 décembre 2023 : un développement de la production électrique à partir d'énergie renouvelable en France :

(MW)	Puissance totale installée en 2014	Objectif de puissance totale installée fin 2018	Objectif de puissance totale installée fin 2023	
			Scénario bas	Scénario haut
Éolien terrestre	9 300	15 000	21 800	26 000
Solaire photovoltaïque	5 300	10 200	18 200	20 200
Hydroélectricité	25 300	25 300	25 800	26 050
Bois-énergie	297	540	790	1 040
Méthanisation	85	137	237	300
Géothermie électrique	/	8	53	
Déchets, biogaz de décharge et de STEP	1 200	1 350	1 500	

Développement de la production électrique à partir d'EnR en France – Source : DREAL Grand-Est

En parallèle, divers documents cadres réalisés aux différentes échelles d'intervention ont été élaborés et viennent encadrer tout nouveau projet d'aménagement.

SRCAE Bretagne

Les conseils régionaux ont élaboré, en cohérence avec les objectifs nationaux et en tenant compte des spécificités et des enjeux locaux, des Schémas Régionaux du Climat et de l'Air et de l'Energie (SRCAE) afin d'accompagner le développement des énergies renouvelables sur le territoire régional.

Les orientations proposées dans le cadre du SRCAE visent à l'horizon 2020 et 2050 :

		Scénario de référence		Scénario volontariste	
		Horizon 2020	Horizon 2050	Horizon 2020	Horizon 2050
Résidentiel	énergie/2008	- 19 %	- 44 %	- 38 %	- 81 %
	GES/2005	- 3 %	- 25 %	- 20 %	- 78 %
Tertiaire	énergie/2007	- 2 %	- 3 %	- 27 %	- 27 %
	GES/2007	- 12 %	- 28 %	- 45 %	- 59 %
Transport personnes	énergie/2005	- 17 %	- 65 %	- 26 %	- 65 %
	GES/2005	- 20 %	- 65 %	- 28 %	- 65 %
Transport marchandises	énergie/2005	- 7 %	- 21 %	- 16 %	- 60 %
	GES/2005	- 7 %	- 21 %	- 16 %	- 60 %
Agriculture	énergie/2005	- 9 %	- 30 %	- 15 %	- 49 %
	GES/2005	- 6 %	- 23 %	- 8 %	- 36 %
Industrie	énergie/2005	- 5 %	- 15 %	- 12 %	- 40 %
	GES/2005	- 5 %	- 15 %	- 12 %	- 40 %
Total	énergie/2005	- 12 %	- 32 %	- 26 %	- 60 %
	GES/2005	- 8 %	- 26 %	- 17 %	- 52 %

Source : SRCAE Bretagne 2013-2018

Si une mobilisation volontariste du potentiel breton de réduction des consommations d'énergie était mise en œuvre, elle permettrait : - d'ici 2020, de réduire de 26 % les consommations bretonnes d'énergie finale (au-delà de l'objectif national de 20 %), par rapport à celles de 2005 ; - d'ici 2050, de réduire de 60 % les consommations bretonnes d'énergie finale, par rapport à celles de 2005.

Consommations en énergie finale	Potentiel de développement des EnR	
	Bas	Haut
Scénario de référence	19 %	24 %
Scénario volontariste	22 %	28 %

Parts des productions bretonnes d'énergies renouvelables dans la consommation bretonne d'énergie finale en 2020

– Source : SRCAE Bretagne

Le Plan d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) du PLUi de Rennes

Le PADD du PLUi a été présenté au Conseil de Rennes Métropole le 13 décembre 2018. Il définit des orientations générales sur la transition énergétique à adopter pour le territoire :

- Renforcer la dynamique métropolitaine au bénéfice de son territoire et de la Bretagne
- Mettre en place une armature urbaine conciliant attractivité, proximité et sobriété
- Inscrire la métropole dans une dynamique de transition

1.2 Contexte du site

1.2.1 Localisation du site

Le site Pontchaillou

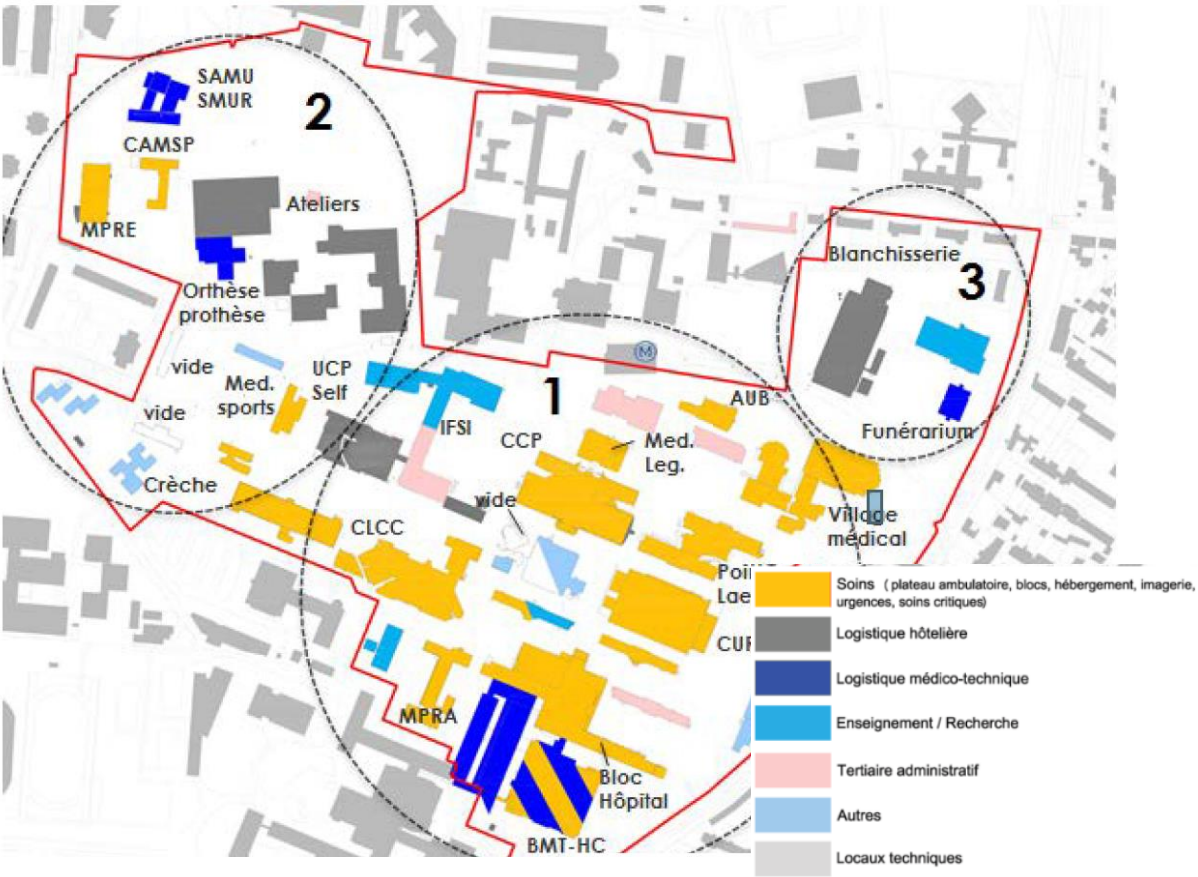
Le CHU Pontchaillou se trouve à Rennes, non loin du centre-ville. Rennes est le chef-lieu du département d'Ille-et-Vilaine et de la région Bretagne. La ville se situe à la confluence de l'Ille et de la Vilaine. Plus grande ville de Bretagne, elle accueille environ 216 000 habitants intra-muros. Rennes Métropole est composée de 43 communes, et accueille 438 000 habitants.

Le site du CHU de Pontchaillou se compose en 3 grandes zones, sur une superficie de 32 ha :

- **Zone 1** (zone centrale) : caractérisée par une majorité d'activités de soin et la logistique medicotechnique - 30 bâtiments, environ 213 000 m² soit 87 % de la surface totale. Cette zone est la plus tournée vers la ville et la mieux connectée aux réseaux (passerelle piéton, voiries véhicules et transports en commun) ;
- **Zone 2** (zone ouest) : où sont implantées principalement les fonctions de logistique hôtelière et medicotechnique - 15 bâtiments, environ 20 000 m², soit 8 % de la surface totale ;
- **Zone 3** (zone nord-est) : orientée plutôt logistique. 3 bâtiments, environ 13 000 m² soit 5 % de la surface totale.

La zone dédiée aux soins représente 40% environ de l'emprise foncière mais 87% du bâti du site.

Le CHU Pontchaillou compte 924 lits et 145 places.



Organisation du site de Pontchaillou - Source : Schéma Directeur Immobilier

Le site principal de Pontchaillou compte :

- 29 salles de blocs opératoires répartis sur 9 sites ;
- 4 IRM, 4 scanners, 8 salles de radiologie conventionnelles, 5 échographies, 2 salles interventionnelles et 1 salle de théra-image ;

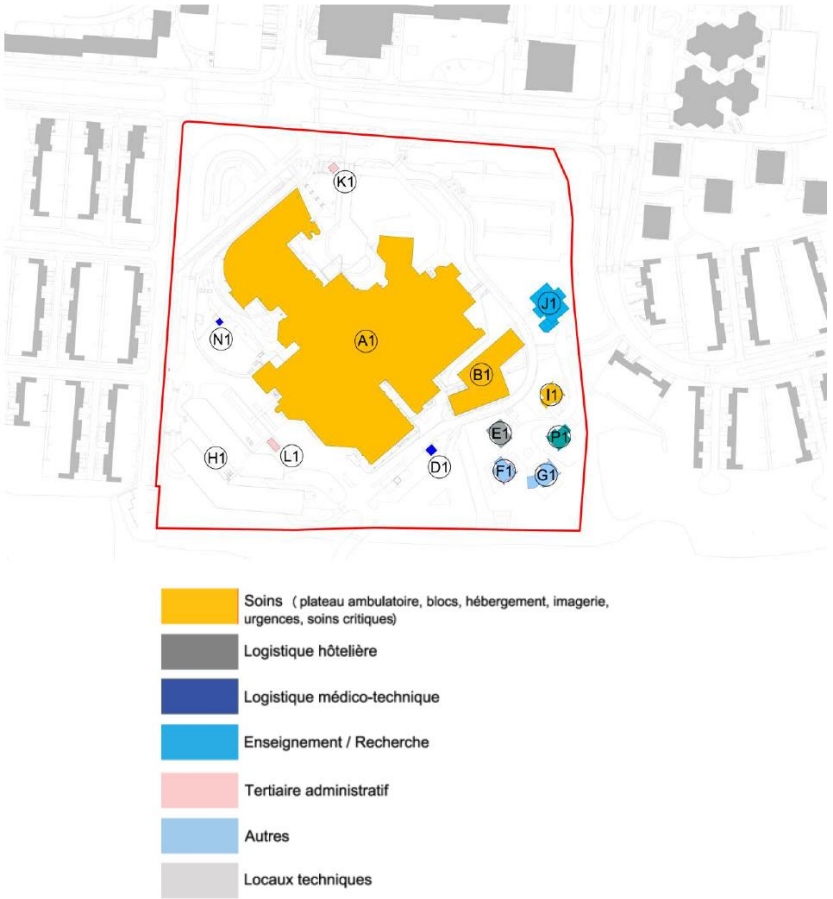
Au total, le CHU Pontchaillou compte actuellement environ 130 000 m² de surface de plancher, répartis sur 48 bâtiments, de taille diverse.

Le site de l'Hôpital Sud

Le site de l'Hôpital Sud, distant de quelques kilomètres de Pontchaillou, se compose de plusieurs bâtiments :

- **Bâtiment A1** : bâtiment hospitalier, qui concentre la quasi-totalité des activités du site, caractérisé par une activité de soin
- **Bâtiment A2** : extension du bâtiment A1, qui a permis de développer des activités de consultation
- **Bâtiment en partie Sud-Est** : bâtiments voués à être démolis ou en cours de session

L'Hôpital Sud compte 354 lits et 58 places.

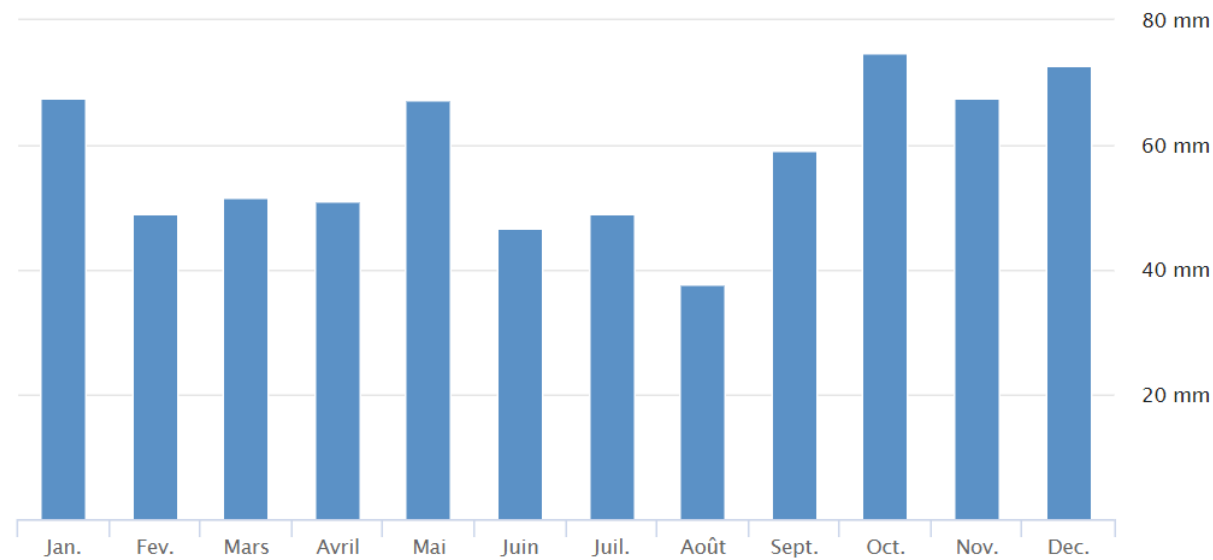


Organisation du site de l'Hôpital Sud - Source : Schéma Directeur Immobilier

Le site Pontchaillou, qui est voué à accueillir l'ensemble des activités des deux sites, est entouré par le Campus Villejean d'un côté, qui accueille de nombreuses facultés dont la faculté de Médecine de Rennes, et le quartier Villejean-Beauregard de l'autre côté, quartier populaire à dominante résidentielle.

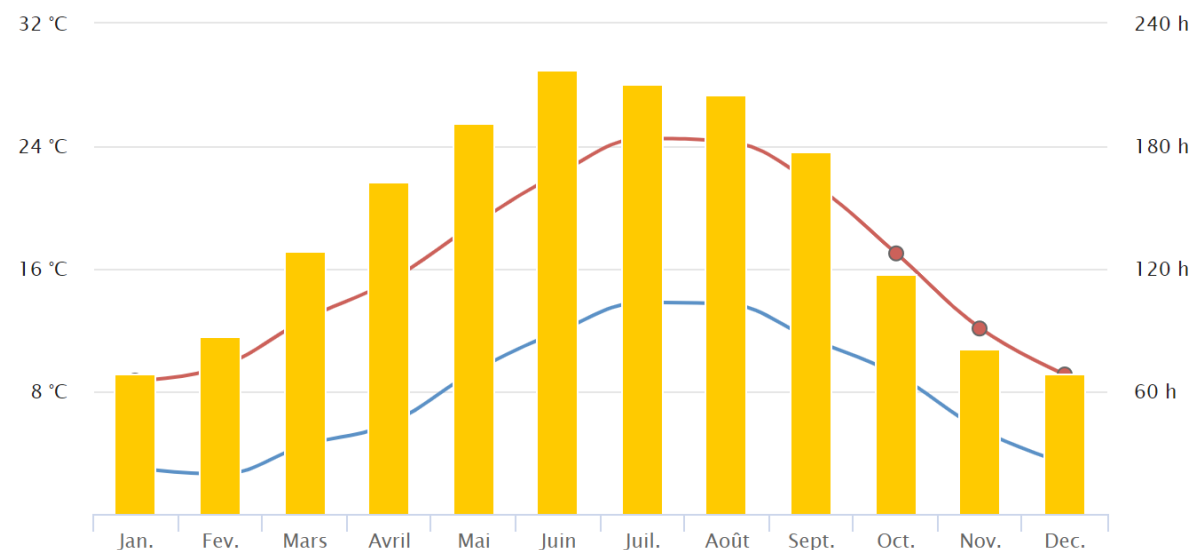
1.2.2 Le climat

Rennes partage avec le reste de la Bretagne son climat océanique, tempéré sans être épargné par les grands froids et les canicules. Le temps est changeant, le soleil jouant souvent avec les nuages, voire les averses. Les pluies sont relativement fréquentes, mais de brève durée en général. Il pleut plus à Nice qu'à Rennes (733 mm/an contre 694 mm/an) mais beaucoup plus souvent à Rennes qu'à Nice où l'ensoleillement est supérieur de 45,5% à celui de Rennes (2724 h/an contre 1717 h/an) et on dénombre 50 jours par an de bon ensoleillement, pour 114 à Nice.



Précipitations relevées (Station de Rennes) – Source : Météo France

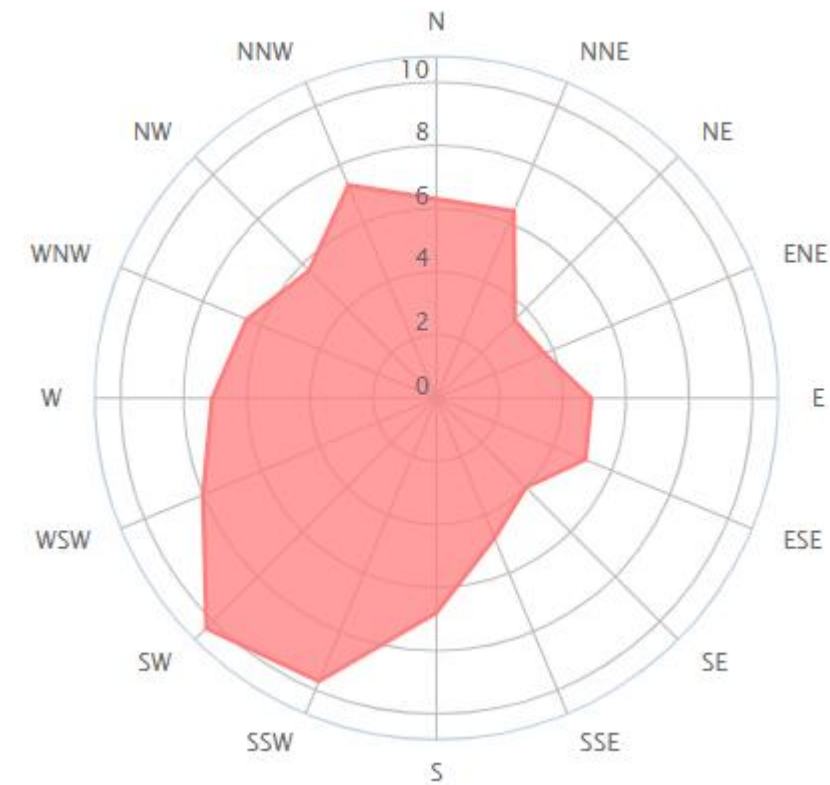
En ce qui concerne les températures moyennes sondées au niveau de la station de Rennes, elles varient en moyenne entre 3 et 25 ° Celsius. Le taux d'ensoleillement quant à lui est assez variable durant l'année avec un taux faible évalué à environ 65 h d'ensoleillement durant le mois de décembre et un taux nettement plus élevé durant la période estivale avec plus de 223 h relevés durant le mois de juillet.



Températures moyennes et ensoleillement relevées (Station de Rennes) – Source : Météo France

Une majorité des vents dominants proviennent de la direction sud-ouest. Les vents sont les plus souvent de force faible à modéré et leurs vitesses moyennes sur le secteur varie entre 3 et 4 m/s.

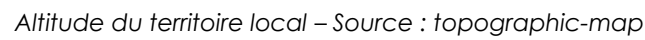
Distribution de la direction du vent en // %



Direction des vents à l'année, sur la station de l'aéroport de Rennes – Source : Windfinder

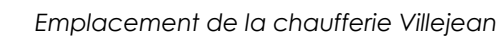
Actuellement, le site est imperméabilisé sur la quasi-totalité de son périmètre d'étude. Cette configuration est un facteur qui favorise le phénomène d'îlot de chaleur urbain, et qui réduit les capacités de confort climatique à l'extérieur.

Il s'élève à une altitude d'environ 45 mètres et est relativement plat. Les variations de topographie entre l'est et l'ouest, sont de moins de 20 mètres.

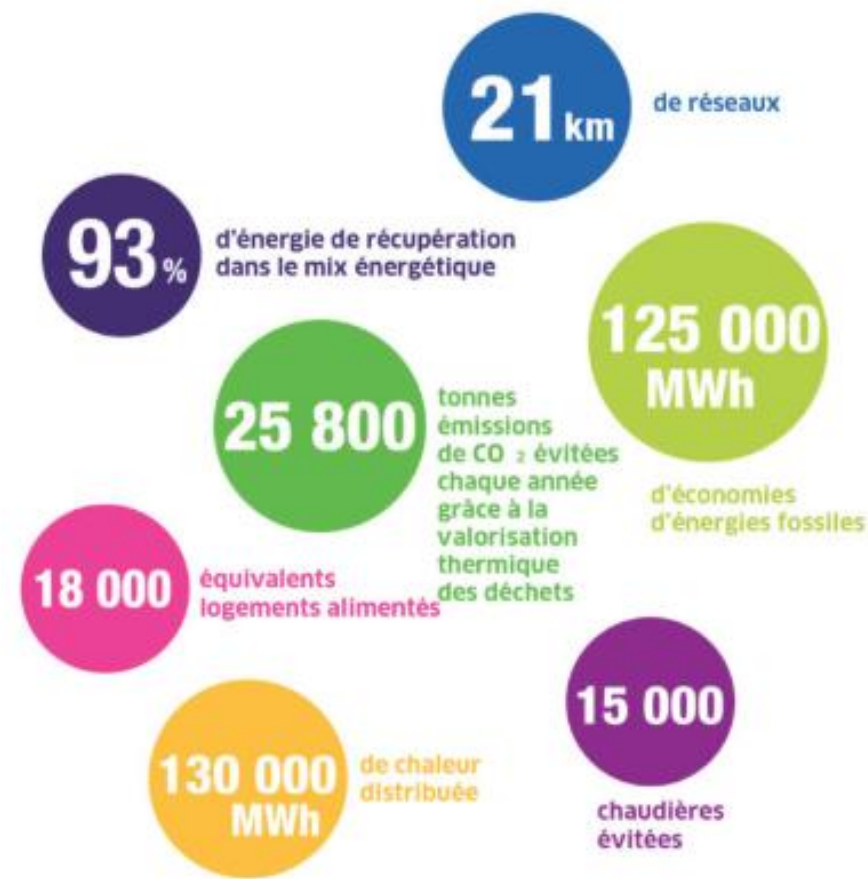


Le Réseau de chaleur Rennes-Nord

Le site du CHU de Pontchaillou est desservi par le réseau de chaleur Rennes-Nord, alimenté par une centrale thermique et son incinérateur à déchets ménagers. Créé il y a une quarantaine d'années, ce réseau alimente aujourd'hui près de 18 000 équivalents logements en chauffage et eau chaude sanitaire.



Juin 2020 - 7



Principaux chiffres clés du réseau de chaleur Rennes-Nord

La centrale thermique de Villejean se trouve à moins d'un kilomètre du site de Pontchaillou.

L'Unité de Valorisation Énergétique traite 144 000 tonnes de déchets par an. Ces déchets ne sont pas simplement incinérés : ils sont valorisés en énergie. En effet, les déchets permettent de produire deux types d'énergie : de la chaleur, envoyée dans le réseau de chauffage urbain, et de l'électricité, utilisée pour les besoins de l'usine ou revendue à EDF. A noter qu'une modernisation de cette usine est prévue d'ici à 2022, avec le but de répondre aux futures normes sur les rejets, et de produire davantage d'énergie avec la même quantité de déchets incinérés.

Le réseau électrique

Le site est aujourd'hui bien desservi par le réseau électrique. L'alimentation électrique continue sur le site est primordiale. La nécessité d'assurer la continuité de l'alimentation électrique au sein des établissements de santé est une obligation légale puisque l'article L. 6112-2 du Code de la Santé Publique précise que les établissements de santé doivent veiller à la continuité des soins, y compris en cas de crise.

Les différents services présents sur le site du CHU, et notamment les plus critiques comme les blocs opératoires ou les soins intensifs, ne doivent pas subir de coupures de courant.

Le réseau mis en place sur le site permet d'assurer la continuité de l'alimentation électrique,



Réseau électrique sur le site du CHU Pontchaillou

1.2.5 Consommations énergétiques du site

Consommations énergétiques

A l'échelle du CHU Pontchaillou, les consommations énergétiques s'élèvent à :

- Chauffage : 18 782 MWh/an
- Froid : 10 161 MWh/an (consommation frigories) pour une consommation électrique de 3 175 MWh/an (année 2018)
- Electricité : 30 367 MWh/an
- Eau chaude sanitaire : 4 085 MWh/an

Le CHU Pontchaillou appelle 14MW de chaud au réseau de chaleur qui l'alimente afin de couvrir la totalité de ses besoins en chauffage et eau chaude sanitaire. Seuls deux petits bâtiments annexes ne sont pas alimentés par le réseau de chaleur, et sont chauffés au gaz.

Le froid est généré sur le site par des groupes froids indépendants, à l'échelle de chaque bâtiment.

Du côté de l'Hôpital Sud, les consommations énergétiques s'élèvent à :

- Chauffage : 7 000 MWh/an
- Froid : 2 583 MWh/an
- Electricité : 5 393 MWh/an
- Eau chaude sanitaire : 1 522 MWh/an

Les performances énergétiques des bâtiments du CHU Pontchaillou et de l'Hôpital Sud sont une des explications des fortes consommations de chaud sur le site. Bâti à partir de 1960, une majorité des bâtiments ont été construits avant les années 1980. Ceux-ci ne respectent donc probablement pas de réglementation thermique (la première réglementation thermique pour les bâtiments non résidentiels datant de 1988). Les bâtiments sont donc globalement très énergivores, et la reconstruction du site représente un enjeu majeur en termes de consommations du parc bâti.

Aussi, la consommation d'électricité sur ces sites est très élevée, du fait des forts besoins électriques des équipements et machines hospitaliers nécessaires au bon fonctionnement des sites.

1.2.6 Programmation et organisation spatiale du projet

Le projet prévoit la démolition d'une grande partie du CHU existant. Sera ensuite construit le programme suivant :

Le projet de reconstruction s'articule autour d'opérations principales, auxquelles sont associées plusieurs opérations connexes et notamment la démolition de bâtiments existants.

CENTRE CHIRURGICAL ET INTERVENTIONNEL (CCI)

- Emprise foncière disponible : 8 000 m²
- Surface : 50 000 m² SDO
- Nombre de niveaux : R+6
- Niveaux d'infrastructure : 1
- Volume prévisionnel de terrassement : 48 000 m³

INSTITUT REGIONAL DE CANCEROLOGIE (IRC)

- Emprise foncière disponible : 7200 m²
- Surface : 25 000 m² SDO
- Nombre de niveaux : R+5 à R+6
- Niveaux d'infrastructure : 1
- Volume prévisionnel de terrassement : 43 000 m³

EXTENSION DU CENTRE CARDIO PNEUMOLOGIQUE

- Emprise foncière disponible : 4 600 m²
- Nombre de niveaux : R+1
- Niveaux d'infrastructure : 1
- Volume prévisionnel de terrassement : 28 000 m³

PÔLE FEMME MERE ENFANT (FME)

- Emprise foncière disponible : 6 500 m² (hors emprise disponible futur parvis des urgences)
- Surface : 35 000 m² SDO
- Nombre de niveaux : R+5 à R+6
- Niveaux d'infrastructure : 1
- Volume prévisionnel de terrassement : 39 000 m³

PLATEFORME LOGISTIQUE (PLA)

- Emprise foncière disponible : 8 000 m²
- Surface : 5 700 m² SDO
- Nombre de niveaux : RDC double hauteur
- Niveaux d'infrastructure : 1
- Volume prévisionnel de terrassement : 20 000 m³ + 3 000 m³ de galerie enterrée

BATIMENT TERTAIRE

- Emprise foncière disponible : 2 000 m²
- Surface : 3 500 m² SDO
- Nombre de niveaux : R+2 à R+3

BÂTIMENTS D'HOSPITALISATIONS

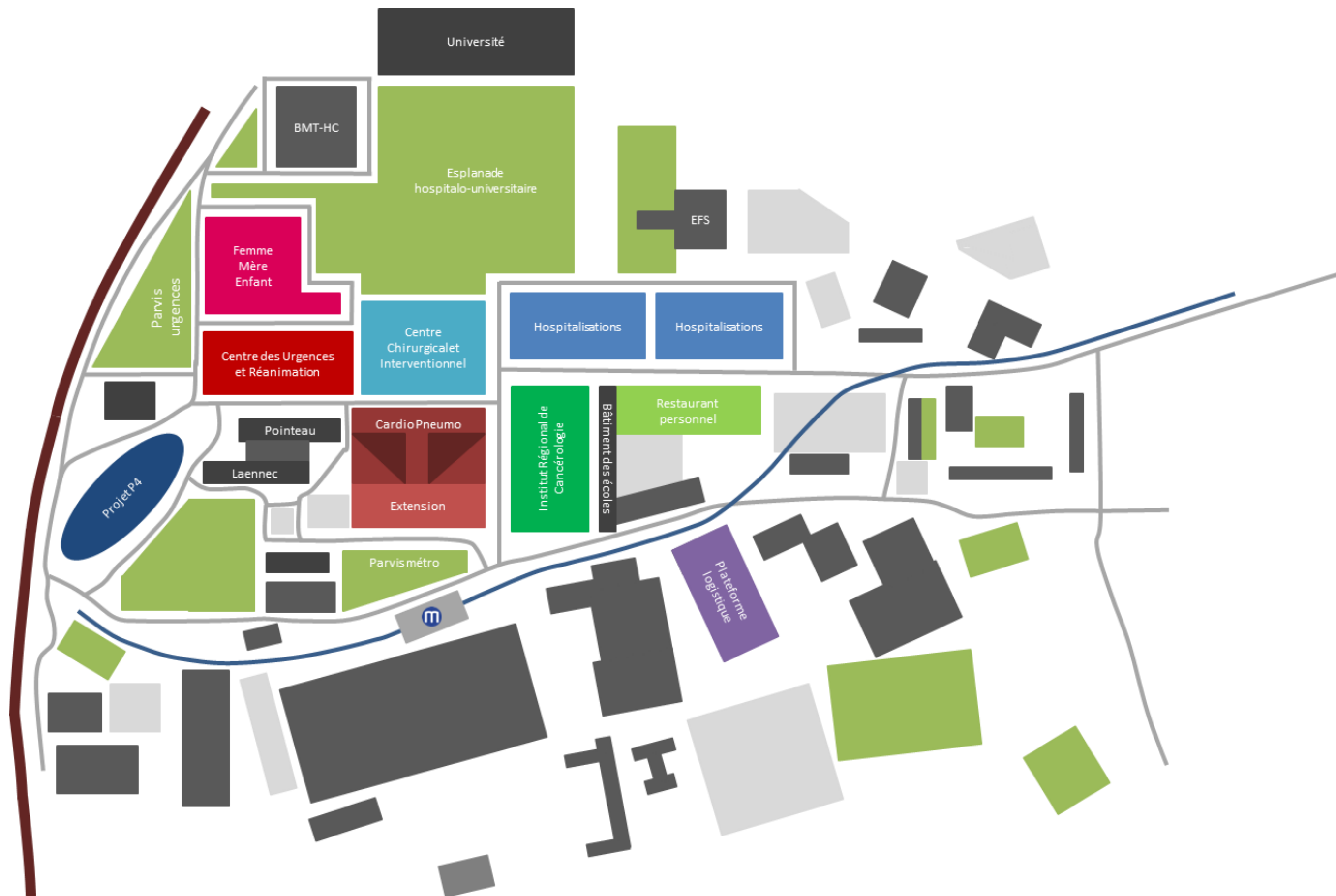
- Emprise foncière disponible : 8 900 m²
- Surface : 30 000 m² SDO
- Nombre de niveaux : R+3 à R+4
- Niveaux d'infrastructure : 2 au maximum (principalement du parking)
- Volume prévisionnel de terrassement : 78 000 m³

AMENAGEMENTS URBAINS

Un programme d'aménagement urbain viendra compléter les projets de construction, à savoir :

- Le mail « Hospitalo-universitaire » longeant les futurs Centre Chirurgicaux Interventionnel et Institut Régional de Cancérologie ;

- Le parvis du métro dans le cadre de l'opération du Centre Cardio Pneumologique ;
- Le parvis des urgences dans le cadre de l'opération du Pôle Femme-Mère-Enfant ;
- Le mail « Flandre Dunkerque » longeant les futurs bâtiments d'hospitalisation ;
- Le reste des aménagements au fur et à mesure de l'avancement des opérations probablement sur la base d'un marché en contrat cadre.



Plan masse du projet en 2029 – Source : CHU Pontchaillou

Le phasage des travaux prévu est le suivant. Chaque projet intègre des opérations connexes identifiées comme prérequis aux travaux principaux de bâtiment.

Phase 1 :

- Travaux de construction du Centre Chirurgical et Interventionnelle (CCI) 2020-2023 :
 - o Démolition du Bâtiment Urgence Réanimation (BUR) en 2017
 - o Démolition du TEP Scan dans l'emprise du projet
 - o Démolition du Pavillon Clémenceau prévu en 2020
- Travaux de construction de la Plateforme Logistique (PLA) 2021-2023
- Travaux de construction du Pôle Femme-Mère-Enfant (PFME) 2021-2024 et aménagement du parvis des urgences :
 - o Démolition des pavillons Ballé et Le Chartier
 - o Démolition des bâtiments Les Marronniers et l'Internat (future emprise du parvis)
- Travaux de construction de l'Institut Régional de Cancérologie (IRC) 2022-2024 :
 - o Démolition du bâtiment Lanteri-Laura
 - o Démolition de l'amphithéâtre du bâtiment des écoles
- Travaux de construction du bâtiment Tertiaire 2021-2022
 - o Démolition du bâtiment de l'ancienne Annexe Pharmacie
- Travaux de réhabilitation du Centre des Urgences et Réanimations (CUR) 2024-2025
- Travaux de construction du bâtiment mixte parking silo P4 2021-2024

Phase 2 :

- Travaux de restructuration et d'extension du Centre Cardio Pneumologique (CCP) 2023-2026 et aménagement du parvis du métro :
 - o Démolition du pavillon Tardieu
- Travaux de construction des bâtiments d'hospitalisation 2025-2028 et aménagement du mail de l'avenue Flandre Dunkerque
 - o Démolition des bâtiments du Centre Eugène Marquis
 - o Démolition du bâtiment Cyclotron
- Travaux de réhabilitation du bâtiment Pointeau-Laennec 2028-2029

Phase 3 :

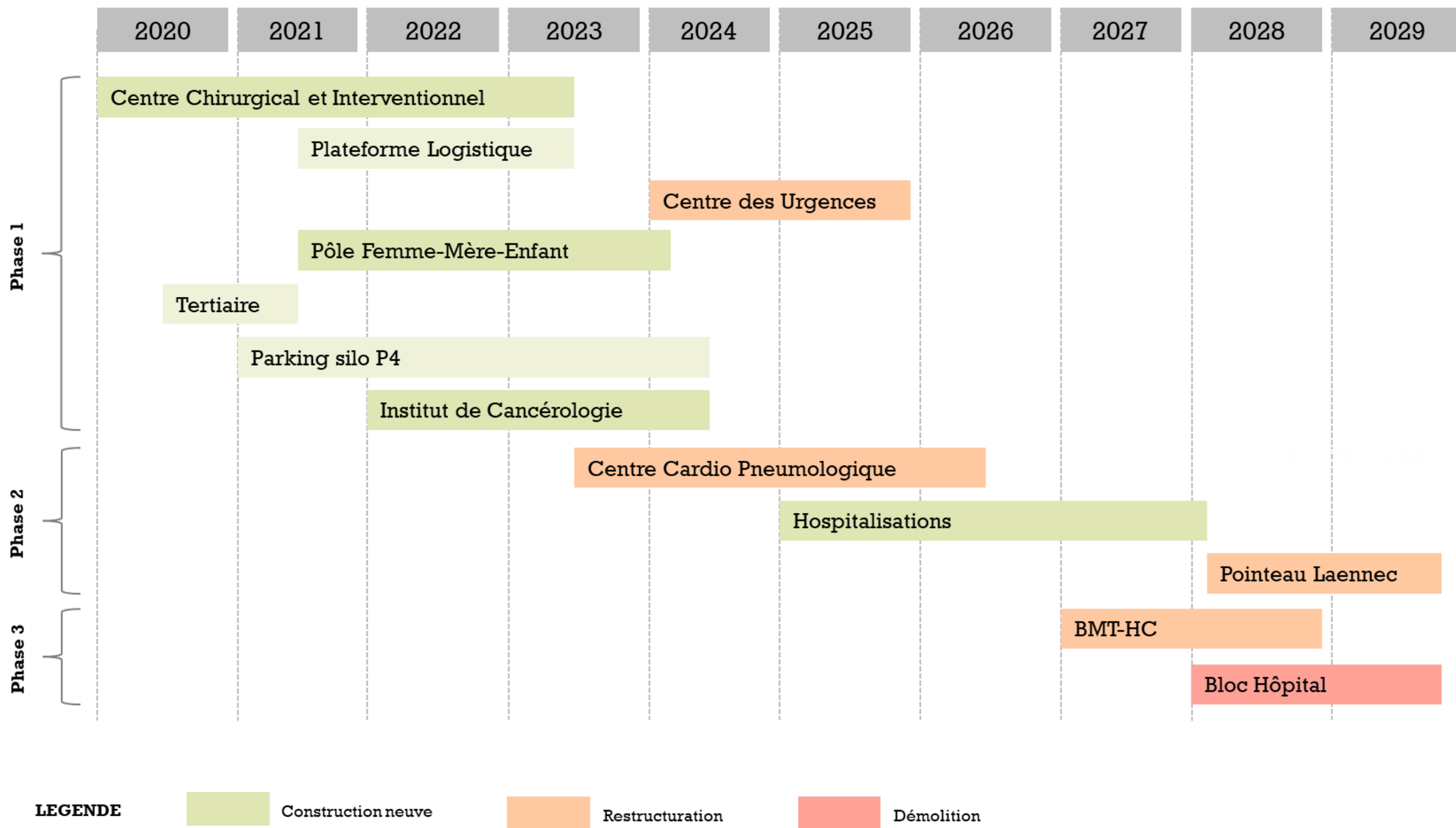
- Travaux de réhabilitation du bâtiment BMT-HC 2027-2028
- Travaux de démolition du Bloc Hôpital (BH) et du Village médical 2028-2029 et aménagement de l'esplanade hospitalo-universitaire

L'ensemble des bâtiments sera développé autour d'un projet global d'aménagements urbains et paysagers comprenant notamment l'aménagement d'une esplanade hospitalo-universitaire entre le métro et l'université de Rennes 1.

Le carnet de phasage complet et détaillé se trouve en annexe de la présente étude d'impact.



Périmètre opérationnel des phases de construction du projet – Source : Schéma directeur immobilier



1.2.7 Les besoins énergétiques associés

Descriptif des besoins estimés

Les besoins estimés dans la présente étude seront calculés vis-à-vis de plusieurs usages :



Besoins de chauffage : il s'agit du chauffage des bâtiments construits et/ou réhabilités. Le calcul se fera de façon à s'approcher au maximum de la réalité des besoins des futurs usagers.



Besoins d'eau chaude sanitaire (ECS) : ils correspondent aux besoins d'eau chaude sanitaire pour les bâtiments construits et réhabilités. Il sera estimé en fonction du taux d'occupation et notamment de la typologie du bâtiment.



Besoins de froid : ils permettent d'étudier les besoins en refroidissement des bâtiments construits et réhabilités. Il s'agira ici de calculer, au même titre que le chauffage, un estimatif qui se rapproche au plus de la réalité.



Besoins d'électricité : ils correspondent aux besoins auxiliaires liés aux ensembles des postes ayant recours à une énergie électrique. **Le calcul estimatif ne prendra pas seulement en compte les postes compris dans la Réglementation Thermique mais également les besoins électriques des différents appareils et équipements électroniques caractéristiques d'un ensemble hospitalier.**

L'analyse de besoins sera étudiée suivant trois niveaux de performance énergétique pour la construction neuve afin de comparer les besoins à prendre en compte selon les niveaux de performance thermique du bâti.

Les besoins énergétiques futurs seront comparés à l'addition des besoins actuels du site Pontchaillou et de l'Hôpital Sud, ainsi qu'à ceux de l'Hôpital Pontchaillou actuels seuls.

A partir des relevés de consommations d'énergie effectués sur le site en 2018, des estimations de consommations ont été réalisées, en prenant en compte les hypothèses suivantes :

- **La consommation d'énergie pour le chauffage va augmenter par rapport au site Pontchaillou actuel mais en diminution par rapport aux deux sites conjoints. Malgré la reconstruction de 138 000 m² de bâtiments neufs, remplaçant 106 000 m² de bâtiments anciens et mal isolés et la réhabilitation thermique de 23 000 m² (sur le site Pontchaillou), la consommation pour le chauffage va augmenter sur le site Pontchaillou du fait de la mise aux normes ou de la création de process propres aux hôpitaux nécessitant de forts apports de chaleur.**
- **Comme pour le chaud, la consommation de froid augmentera par rapport au site Pontchaillou actuel mais diminuera par rapport aux deux sites conjoints. De nouveaux process et installations nécessitant du froid seront installés dans le futur CHU. La conception bioclimatique des bâtiments neufs devrait toutefois limiter les besoins en froid pour la climatisation sur le site.**
- **L'électricité représente le plus gros poste de consommation sur le site à l'heure actuelle. Ces consommations resteront élevés et augmenteront globalement. En effet, de nouveaux appareils et équipements électroniques propres au fonctionnement du site seront ajoutés. De plus, une automatisation globale du site (logistique notamment) engendrera de nouvelles consommations.**

- **Les consommations pour l'eau chaude sanitaire resteront à peu près constante par rapport aux consommations du site Pontchaillou et de l'Hôpital Sud, du fait du maintien de la capacité globale et de l'activité globale du futur site par rapport aux deux sites actuels couplés.**

Les trois niveaux de performance étudiés dans la présente étude seront les suivants :

Niveau réglementaire / RT 2012

Il correspond au niveau de performance minimal actuel, à titre de « calibrage bas » pour l'étude. Même s'il est réglementaire, il est déjà ambitieux par rapport à l'existant puisqu'il impose un niveau de consommations en énergie primaire inférieur de 50% par rapport à la précédente Réglementation Thermique RT 2005.

Le calcul des besoins des nouvelles constructions se base sur des ratios de besoins utiles par m² pour des constructions respectant la RT 2012. Ces ratios, présentés dans le tableau ci-dessous, ont été estimés pour les différents usages de chauffage, de production d'ECS, de refroidissement et d'électricité :

- 1- Sur la base des données climatiques du secteur ;
- 2- Selon la nature des bâtiments ;
- 3- Selon l'activité dans les bâtiments ainsi que les process et équipements présents sur le site.

Ratios de répartition par usages de consommation :

Besoins	RT2012			
	Chauffage (en kWh/m ² /an)	ECS (en kWh/m ² /an)	Froid (en kWh/m ² /an)	Electricité (en kWh/m ² /an)
Hopital	162,5	46,3	87,5	225,0

Niveau ambitieux (niveaux visés) / RT 2012 - 20 %

Il correspond à un niveau équivalent aux exigences fixées par le référentiel Energie+ Carbone- pour les bâtiments neufs. Ce référentiel intègre des critères environnementaux qui complètent les exigences actuelles de performances énergétiques pour les projets de construction. Le référentiel a pour but de préparer la prochaine réglementation thermique RT 2020.

Il définit la performance du bâtiment à travers :

- 1- L'évaluation son bilan énergétique sur l'ensemble des usages (bilan énergétique BEPOS) ;
- 2- L'évaluation de ses émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de son cycle de vie ainsi que pour les produits de construction et les équipements utilisés.

Les niveaux de performance possibles sont les suivants :

Niveaux de performance	Bilan énergétique		Emissions de GES	
	Energie 1 Energie 2 Energie 3 Energie 4	Bilan énergétique nul	Carbone 1 Carbone 2	Empreinte carbone optimisée

Les projets futurs devront mettre en œuvre un effort en termes d'efficacité énergétique du bâti et des systèmes et un recours significatif aux énergies renouvelables, qu'elles produisent de la chaleur ou de l'électricité renouvelable.

La conception optimisée des projets de construction permettra de réduire leur impact environnemental en limitant les consommations d'énergie grise.

Ratios de répartition par usages de consommation :

RT2012 -20%				
Besoins	Chauffage (en kWh/m²/an)	ECS (en kWh/m²/an)	Froid (en kWh/m²/an)	Electricité (en kWh/m²/an)
Hopital	130,0	37,0	70,0	225,0

Une des hypothèses prises dans ce cas concerne les consommations d'électricité. Etant donné que celles-ci sont entièrement dépendantes du site et de son activité particulière, elles ne peuvent être réduites. Les machines et équipements présents sur le site sont primordiales au bon fonctionnement du site. De plus, le site est sujet à des normes strictes pour la sécurité et le confort des patients et personnels.

Niveau exemplaire / Bâtiments passifs

Il correspond à un niveau exemplaire en comparaison avec la réglementation en vigueur. Une performance thermique de niveau passif peut permettre de réduire les besoins énergétiques de 35 à 40 % par rapport au niveau réglementaire actuel RT 2012. Une construction respectant ce niveau d'exigence permet notamment de réduire le poste des besoins de consommation liés au chauffage.

Là aussi, l'hypothèse de maintien des consommations électriques a été prise.

Ratios de répartitions par usage de consommation :

Passif				
Besoins	Chauffage (en kWh/m²/an)	ECS (en kWh/m²/an)	Froid (en kWh/m²/an)	Electricité (en kWh/m²/an)
Hopital	34,6	21,1	26,9	225,0

Niveaux de performance de la rénovation énergétique selon label

Effinergie Rénovation

Pour les bâtiments rénovés sur le site, la consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux est inférieur de 40% à la consommation conventionnelle de référence définie dans la Réglementation Thermique dite Globale (**Cep < Cref - 40%**). **Quelques bâtiments seront rénovés sur le site, représentant 23 000 m².**

Ratios de répartition par usages de consommation :

Rénovation RT2012 EFFINERGIE				
Besoins	Chauffage (en kWh/m²/an)	ECS (en kWh/m²/an)	Froid (en kWh/m²/an)	Electricité (en kWh/m²/an)
Hopital	101,5	21,7	54,6	225,0

Estimation des besoins énergétiques

Sur la base des différentes hypothèses précisées précédemment à l'aide de ratios selon différents niveaux d'exigences de performance thermique, une estimation des besoins énergétiques à l'échelle du secteur peut être effectuée.

Ci-après les estimations des besoins énergétiques calculées selon les différents niveaux d'exigence énergétique.

Niveaux réglementaires pour les constructions

RT2012											
Besoins	Chauffage (en kWh/m²/an)	ECS (en kWh/m²/an)	Froid (en kWh/m²/an)	Electricité (en kWh/m²/an)	Surface de plancher construite (m²)	Besoins en chauffage (kWh/an)	Besoins en ECS (kWh/an)	Besoins en Froid (kWh/an)	Besoins en électricité (kWh/an)	Besoins totaux (kWh/an)	Besoins totaux (GWh/an)
CONSTRUCTIONS - RENOVATIONS (RT 2012)											
Bâtiments réhabilités	101,5	21,7	54,6	225,0	22 964	2330846	498319	1253834	5166900	9249899	9,25
Bâtiments neufs	162,5	46,3	87,5	225,0	137 965	22419313	6380881	12071938	31042125	71914256	71,91
				TOTAL	160 929	24 750 159	6 879 200	13 325 772	36 209 025	81 164 155	81,16
									TOTAL	81164155	81,16

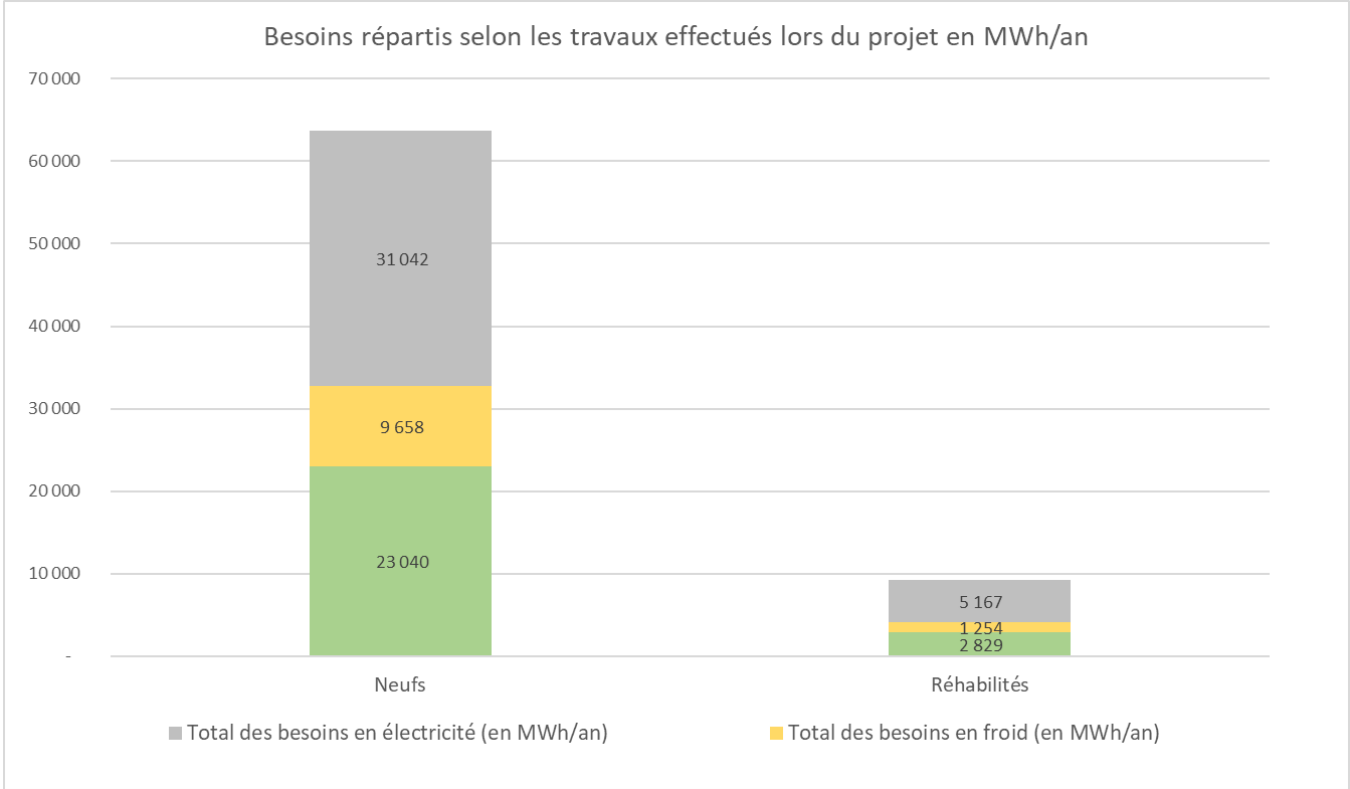
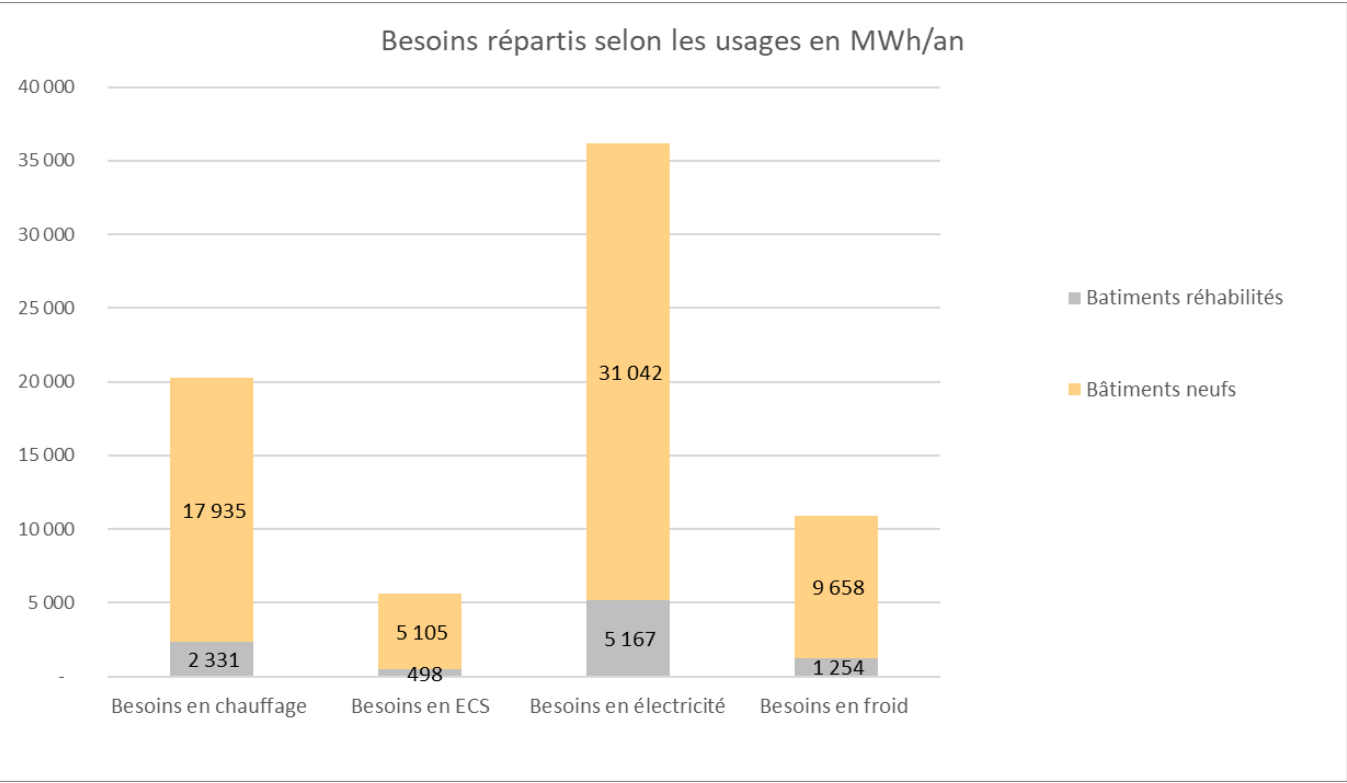
Niveaux ambitieux pour les constructions

RT2012 - 20 %											
Besoins	Chauffage (en kWh/m²/an)	ECS (en kWh/m²/an)	Froid (en kWh/m²/an)	Electricité (en kWh/m²/an)	Surface de plancher construite (m²)	Besoins en chauffage (kWh/an)	Besoins en ECS (kWh/an)	Besoins en Froid (kWh/an)	Besoins en électricité (kWh/an)	Besoins totaux (kWh/an)	Besoins totaux (GWh/an)
CONSTRUCTIONS - RENOVATIONS (RT 2012 - 20%)											
Bâtiments réhabilités	101,5	21,7	54,6	225,0	22 964,00	2330846	498319	1253834	5166900	9249899	9,25
Bâtiments neufs	130,0	37,0	70,0	225,0	137 965,00	17935450	5104705	9657550	31042125	63739830	63,74
				TOTAL	160 929	20 266 296	5 603 024	10 911 384	36 209 025	72 989 729	72,99
									TOTAL	72989729	72,99

Niveaux exemplaires pour les constructions

PASSIF											
Besoins	Chauffage (en kWh/m²/an)	ECS (en kWh/m²/an)	Froid (en kWh/m²/an)	Electricité (en kWh/m²/an)	Surface de plancher construite (m²)	Besoins en chauffage (kWh/an)	Besoins en ECS (kWh/an)	Besoins en Froid (kWh/an)	Besoins en électricité (kWh/an)	Besoins totaux (kWh/an)	Besoins totaux (GWh/an)
CONSTRUCTIONS - RENOVATIONS (PASSIF)											
Bâtiments réhabilités	101,5	21,7	54,6	225,0	22 964,00	2330846	498319	1253834	5166900	9249899	9,25
Bâtiments neufs	34,6	21,1	26,9	225,0	137 965,00	4768070	2913821	3708499	31042125	42432515	42,43
				TOTAL	160 929	7 098 916	3 412 140	4 962 334	36 209 025	51 682 415	51,68
									TOTAL	51682415	51,68

Analyse des besoins énergétiques nécessaires à destination des différents usages construits sur le site de l'Hôpital Pontchaillou, au niveau de performance visé (RT2012 -20%) :



Les besoins estimés les plus importants recensés pour le site Pontchaillou sont très largement l'électricité, puis le chauffage. Suivent ensuite les besoins en froid, puis ceux eau chaude sanitaire.

Sont pris en compte dans ces estimations la globalité des besoins électriques du site, et non les seuls postes de l'éclairage et des auxiliaires, qui devraient être pris exclusivement en compte réglementairement parlant. Ceux-ci ne représenteraient qu'une petite partie des besoins (environ 15%), la demande en électricité des équipements hospitaliers étant bien plus importante.

Comparaison des besoins énergétiques par usages de consommation selon les ambitions de performance



Comparaison des besoins énergétiques selon les niveaux de performance étudiés

Actuels (Pontchaillou + Hôpital Sud) : 77.6 GWh

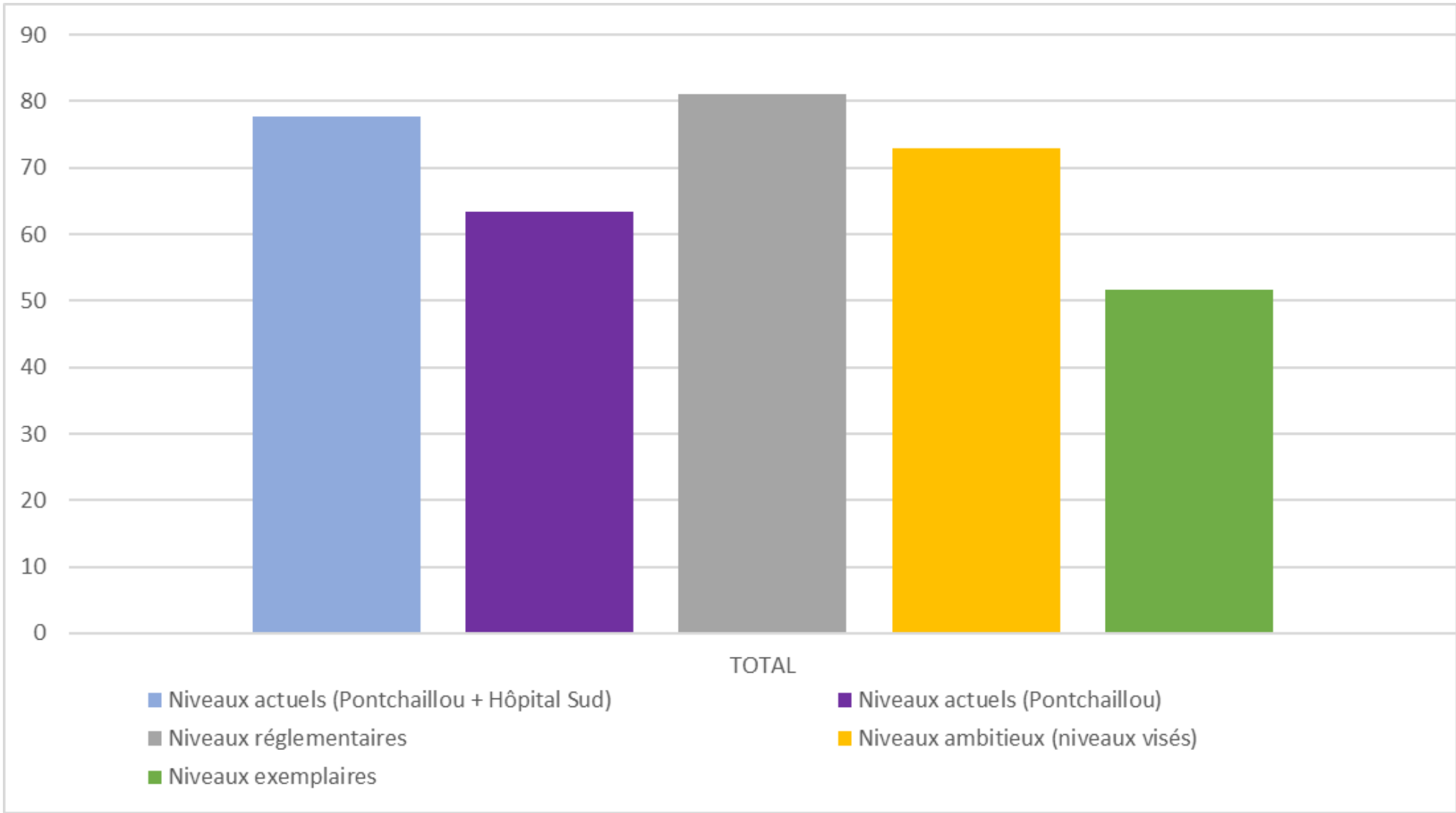
Actuels (Pontchaillou) : 63.3 GWh

Réglementaires : 81.2 GWh

Ambitieux : 73.0 GWh

Exemplaires : 51.7 GWh

Sur la base de ces hypothèses, les besoins totaux en énergie du site de l'hôpital Pontchaillou seront compris entre 81.2 et 51.7 GWh/an.



2. Potentiel de développement des énergies renouvelables

Nous présentons dans cette partie les différentes sources d'énergies renouvelables qui pourraient être mobilisées pour l'alimentation du projet en chaleur.

2.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire peut être valorisée à travers l'implantation de divers dispositifs :

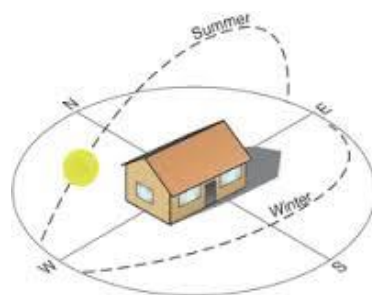
- La conception adaptée des bâtiments, qui permet d'exploiter au mieux les apports solaires pour couvrir les besoins de chauffage ;
- Les panneaux solaires thermiques peuvent être utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire, pour le chauffage des constructions ou encore pour la production de froid. Leur fonctionnement consiste à capter la chaleur d'une partie des rayonnements solaires qu'ils reçoivent (l'autre partie étant réfléchi) et à la transférer à un fluide caloporteur ;
- Les panneaux photovoltaïques permettent de produire de l'électricité par conversion de lumière en électricité.

2.1.1 Solaire passif

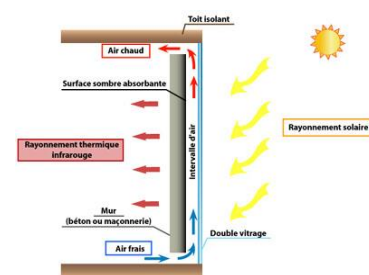
Le solaire passif regroupe les solutions, essentiellement constructives, qui utilisent passivement l'énergie du soleil pour le chauffage des locaux en hiver. Quel que soit la conception des bâtiments, ces derniers bénéficient d'une part de solaire passif, le tout étant d'optimiser l'apport de solaire passif pour en retirer le plus de bénéfice. Afin que le recours à ce solaire passif soit pertinent, il faut pouvoir en bénéficier en hiver mais s'en prémunir en été pour éviter les surchauffes dans le bâtiment et donc des consommations de rafraîchissement plus importantes.

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

- Recul suffisant entre les bâtiments ou partie 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 par les surfaces vitrées ou grâce à des dispositifs comme un mur trombe.



Ensoleillement des façades

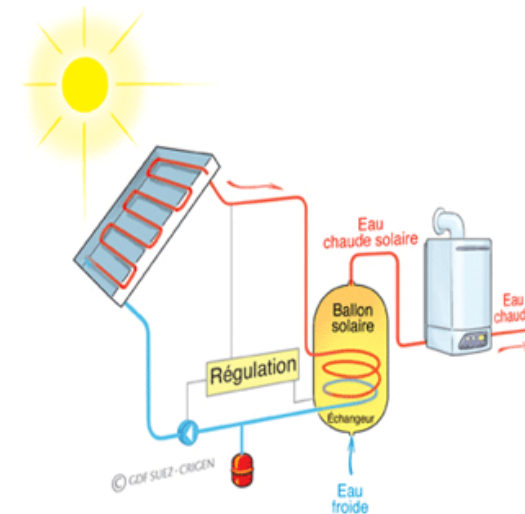


Mur trombe

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

2.1.2 Solaire thermique

Principe de fonctionnement



Le principe de fonctionnement du solaire thermique consiste à utiliser l'énergie provenant du rayonnement solaire pour la convertir en énergie thermique. Il permet de récupérer l'énergie solaire grâce à un fluide caloporteur qui circule dans les capteurs. Par l'intermédiaire d'un échangeur thermique, l'énergie est transférée dans le ballon solaire pour préchauffer l'eau de la ville. 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.

Echelle d'exploitation

Le solaire thermique est une énergie valorisable à l'échelle du bâtiment. Cette technologie est pertinente dès lors que les besoins d'ECS sont importants et stables. C'est notamment le cas pour les logements, ou pour certains équipements publics (crèches, hôpitaux, etc.). Diverses solutions techniques existent aujourd'hui que ce soit pour les maisons individuelles ou les logements collectifs :

- Pour les maisons individuelles : Des systèmes de production solaire optimisés sont disponibles. Ces systèmes présentent une efficacité comparable à un système de production solaire classique (jusqu'à 50% de couverture des besoins d'ECS), mais présentent moins de contraintes techniques et économiques : surface de panneaux solaire et taille du ballon de stockage réduite, et par conséquent coût d'investissement plus faible (3000 à 3500 euros posé fourni).
- Pour les immeubles collectifs, plusieurs types de solutions sont possibles. Ces solutions couvrent jusqu'à 50% des besoins d'ECS du bâtiment. Le coût de revient est d'environ 1 500 euros par logement. Ces technologies sont éligibles au fonds chaleur.

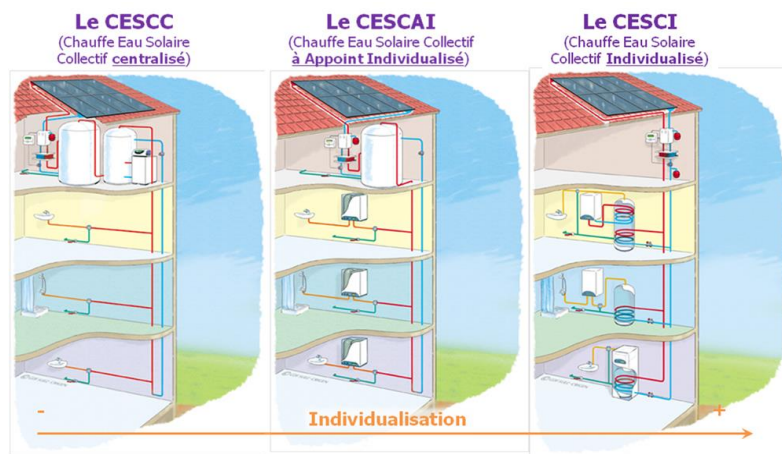


Schéma de différents types de chauffe-eau solaires

Coût global de la technologie

Le coût d'investissement d'une installation solaire varie selon la technologie choisie. En considérant le coût des travaux et celui des études d'ingénierie pour la conception et l'installation d'un chauffe-eau solaire collectif, le coût global s'élève (pour des bâtiments neufs) à :

- 1 500€ HT/m² pour une installation d'une taille inférieure à 50 m² ;
- 1 000€ HT/m² pour une installation d'une taille inférieure à 100 m² ;
- 800€ HT/m² pour une installation d'une taille supérieure à 100 m².

Les coûts d'installations de dispositifs de type moquette solaire sont d'environ 650€ HT/m².

Pendant la phase d'exploitation, les coûts d'entretien sont évalués à environ 300€/an pour une installation de taille supérieure à 100 m². Ils sont forfaitaires et ne dépendent pas réellement de la puissance installée.

Subventions 2019

L'ADEME subventionne ce type d'installation par le biais du « Fonds Chaleur ». Celui-ci est calculé en fonction du nombre de tonnes équivalent pétrole (TEP) évitées. Une TEP est équivalente à 11 630 kWh. Cette aide est soumise à certaines conditions. En effet, le Fonds Chaleur se focalise prioritairement sur les installations de chauffe-eau solaires collectifs (CESC) pour les secteurs suivants :

- Le logement collectif et, par extension, tout hébergement permanent ou de longue durée avec des besoins similaires en eau chaude sanitaire (secteur hospitalier et sanitaire, structures d'accueil, maisons de retraite...) ;
- Le tertiaire privé comprenant les hôtels et hôtels de plein air à usage non saisonnier, les piscines collectives, les restaurants, les cantines d'entreprises ainsi que les activités agricoles et industrielles consommatrices d'eau chaude.

Les aides Fonds Chaleur sont octroyées « aux projets optimisés » qui répondent à un certain nombre de critères, comme notamment la surface de capteurs minimum (25 m²), la productivité minimum par m², ainsi que la mise en place systématique d'une procédure de monitoring de l'installation.

D'autres aides existent également : différentes réductions en provenance de l'Etat (crédit d'impôt, taux de TVA réduit), de la banque (éco-prêt à taux zéro), de l'ANAH, ou encore de la région, département ou commune.

Crédit d'Impôt pour la Transition Energétique :

Chauffe-eau solaire individuel ou système solaire combiné ou PVT (système hybride photovoltaïque et thermique) dans la limite d'un plafond de dépenses par m² de capteurs de :

- 1 000 € TTC pour les capteurs solaires à circulation de liquide produisant uniquement de l'énergie thermique,
- 400 € TTC pour les capteurs solaires à air produisant uniquement de l'énergie thermique,
- 400 € TTC pour les capteurs solaires à circulation de liquide hybrides produisant de l'énergie thermique et électrique (dans la limite de 10 m²),
- 200 € TTC pour les capteurs solaires à air hybrides produisant de l'énergie thermique et électrique (dans la limite de 20 m²) ;

2.1.3 La climatisation solaire

Présentation de la technologie

La climatisation solaire peut être utilisée pour des bâtiments tertiaires dès lors que la conception implique la mise en œuvre d'un système de rafraîchissement.

Dans le cadre de la réalisation d'un projet d'aménagement, les capteurs solaires « sous vides » sont à privilégier. Ce type de système fonctionnant à une température avoisinant les 100°C, le fluide caloporteur présent dans ce type de capteurs permet de supporter la montée en température nécessaire à l'atteinte de la température optimale. Deux systèmes (les plus courants) peuvent être envisagés :

- Les systèmes fermés à absorption : de l'eau glacée est produite par un groupe froid à absorption, utilisable dans une centrale de traitement d'air ou dans un réseau d'eau glacée alimentant des installations décentralisées.
- Les systèmes ouverts dans lesquels l'air est directement traité en fonction du confort souhaité.

Coût global de la technologie

Le coût d'investissement d'une installation de climatisation solaire est d'environ (estimation basée sur les quelques retours d'expérience de réalisations en Europe) : 1 500 € HT/m² de capteurs solaires (système à absorption avec capteurs sous vides).

Les coûts d'entretien pour la phase d'exploitation sont difficilement quantifiables, étant donné le peu de retour d'expérience. Néanmoins, les coûts de maintenance peuvent être considérés comme similaires à ceux d'un système à absorption avec des capteurs.

Subventions 2019

Aucune aide spécifique à la climatisation solaire n'existe actuellement. Néanmoins, les quelques projets réalisés en Europe ont bénéficié d'aides ponctuelles de l'ADEME, de l'Union Européenne et d'EDF.

2.1.4 Le solaire photovoltaïque

Présentation de la technologie

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).

Dans le cadre de la réalisation d'un projet d'aménagement en milieu urbain, le choix de la seconde option semble plus pertinent étant donné que les systèmes autonomes sont plus rentables dans le cas d'habitations isolées (rentabilité supérieure lorsque l'électricité est réinjectée dans le réseau).

Différents systèmes et modules existent sur le marché pour la production d'électricité par photovoltaïque :

- Les modules solaires monocristallins : ils possèdent un meilleur rendement au m² (18-19%), et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints. Le coût, plus élevé que celui d'une autre installation de même puissance, limite le développement de cette technique.
- Les modules solaires polycristallins : actuellement, ils présentent le meilleur rapport qualité/prix et sont les plus utilisés. Ils ont un bon rendement (15-16%) et une durée de vie importante (plus de 35 ans). Ils présentent l'avantage de pouvoir être produits à partir du recyclage de déchets électroniques.
- Les modules solaires amorphes : ces modules ont un avenir prometteur car ils peuvent être souples et ont une meilleure production lorsque l'ensoleillement est faible. Le silicium amorphe possède un rendement divisé moindre par rapport aux systèmes cristallins (8%), ce qui nécessite plus de surface pour la même puissance installée. Toutefois, le prix au m² installé est plus faible que pour des panneaux solaires composés de cellules.
- Les modules solaires en couche mince : ces modules ont un rendement moyen (12%) mais des coûts de production plus faibles que les panneaux cristallins.



Module solaire polycristallin



Module solaire amorphe



Module solaire couche mince

Coût global de la technologie

Le coût d'investissement diminue en fonction de la puissance totale installée, mais également en fonction du cadre réglementaire. Celui-ci évoluant très vite, il est difficile de connaître avec certitude le coût d'une

installation d'ici 1 à 2 ans. A titre indicatif, les coûts donnés par l'ADEME se situent dans les tranches suivantes :

- entre 2,7 et 3,7 euros HT/W pour des systèmes de puissance nominale inférieure à 10 kW, selon le niveau d'intégration au bâtiment des modules ;
- de l'ordre de 2 euros HT/W pour un système de moyenne puissance supérieure à 36 kW, installé sur une grande surface de toiture (toitures commerciales, industrielles, agricoles) ;
- de l'ordre de 1,6 euros HT/W pour une centrale au sol de puissance supérieure à 1 MW.

Si le choix d'exploitation de l'énergie photovoltaïque se porte sur un raccordement au réseau, le prix est différent. Ce coût n'est pas forcément proportionnel à la puissance que l'on souhaite raccorder car il dépend de la faisabilité et de la facilité du raccordement. En effet, la proximité du poste source joue considérablement sur le coût global ; ainsi une petite installation nécessitant de grands travaux pour le raccordement aura un coût bien supérieur à celui d'une installation plus conséquente mais localisée à une distance plus proche (prix évalué par ERDF lors de l'établissement de la proposition technique et financière pouvant aller de 1 000€ à plusieurs dizaines de milliers d'euros).

Le coût d'exploitation est lié principalement à la maintenance des modules (nettoyage, intervention...).

A titre d'exemple, la maintenance d'une installation d'environ 200 kWc (correspond à la puissance que le module peut délivrer dans des conditions optimales de fonctionnement -ensoleillement de 1 000 W/m² et température de 25°C) nécessite un coût d'exploitation estimé à 6 000€/an.

Le coût global et les revenus générés d'une installation photovoltaïque dépendent également du coût de rachat de l'électricité par EDF. Un arrêté relatif au tarif d'achat de l'énergie photovoltaïque a été examiné le 1er juillet 2012 par la Commission de Régulation de l'Energie instituant le réajustement (à la baisse) du tarif chaque trimestre en fonction du volume de projets déposés durant le trimestre passé.

Tarif de rachat

Les tarifs applicables pour les installations sur toiture dépendent de la puissance crête et du degré d'intégration au bâti des installations. Ils sont indexés chaque trimestre selon le volume de projets entrés en file d'attente au trimestre précédent.

Au-delà de 100 kWc, les tarifs sont octroyés par appels d'offres.

Le dispositif de soutien au photovoltaïque prévoit des tarifs d'achat, ajustés chaque trimestre.

Les tarifs d'achats photovoltaïques sont garantis sur une durée de 20 ans et permettent de rentabiliser l'installation de panneaux solaires photovoltaïques. Il existe plusieurs niveaux de tarifs en fonction de la nature et de la puissance de l'installation.

A ce jour, les prix de rachat en cas de vente totale de l'énergie produite et selon les technologies disponibles, sont les suivants :

2019	Type installation	Puissance Kilowatt/crête	Tarif achat
01/01 31/03	au Intégration au bâti	≤3	18.72 €
01/01 31/03	au Intégration au bâti	≤9	15.91 €
01/01 31/03	au Intégration simplifiée au bâti	≤3	18.72 €
01/01 31/03	au Intégration simplifiée au bâti	≤9	15.91 €
01/01 31/03	au Non Intégration au Bâti Intégration au bâti/Intégration simplifiée au bâti<100kWc	≤ 36	12.07 €
01/01 31/03	au Non Intégration au Bâti Intégration au bâti/Intégration simplifiée au bâti<100kWc	≤ 100	11.19 €

Source : Picbleu.fr

Subventions 2019

Le système de crédit d'impôts a été supprimé pour les panneaux solaire photovoltaïques depuis le 1er septembre 2014, et les prix de rachat de l'électricité produite par le photovoltaïque est en baisse au fil des trimestres.

Des primes d'investissement existent pour soutenir le développement de centrales intégrées au bâti en cas de vente partielle de l'énergie. Elles sont, à ce jour, de l'ordre de 0,1 à 0,4 ct€/Wc selon la puissance totale de l'installation. Dans ce cas, la rémunération de l'énergie injectée au réseau varie de 6 à 10 c€/kWh.

Type installation	Puissance (kWc)	primes et tarifs (c€/kWh) du 10/05 au 30/06/17
Sur bâtiment et respectant les critères généraux d'implantation	≤ 3 kwc	prime de 400 € /kwc + vente à 10 c€/kWh)
	≤ 9 kwc	prime de 300 € /kwc + vente à 10 c€/kWh)
Sur bâtiment et respectant les critères généraux d'implantation	≤ 36 kwc	prime de 200 € /kwc + vente à 6 c€/kWh)
	≤ 100 kwc	prime de 100 € /kwc + vente à 6 c€/kWh)
Sur bâtiment et respectant les critères généraux d'implantation	> 100 kwc	0

De plus, un arrêté tarifaire concernant le prix d'achat de l'électricité en revente totale pour un contrat de 20 ans, et instaure une prime d'investissement pour les installations en autoconsommation avec vente de surplus.

Concrètement, 2 cas sont possibles :

- **Vente totale de l'électricité produite** : le client achète un générateur photovoltaïque et vend la totalité de sa production aux tarifs suivants :
 - o pour une installation < ou égale à 3kWc = 18,55 cts€/ kWh
 - o pour une installation entre 3 et 9 kWc = 15,76 cts€/ kWh
 - o pour une installation entre 9 et 36 kWc = 12,07 cts€/ kWh
 - o pour une installation entre 36 et 100 kWc = 11,19 cts€/ kWh
- **Autoconsommation avec vente de surplus** : le client achète un générateur photovoltaïque en autoconsommation, il consomme sa production et vend l'excédent à EDF OA si sa production est supérieure à sa consommation. Cet arrêté prévoit une prime à l'investissement et l'achat du surplus pour les générateurs en autoconsommation. Cette prime est dégressive tous les trimestres en fonction des volumes de demandes de raccordement et elle est versée sur 5 années au producteur. Elle est fixée à :
 - o 0.39 €/Wc pour une installation < ou égale à 3kWc
 - o 0.29 €/Wc pour une installation entre 3 et 9 kWc
 - o 0.19 €/Wc pour une installation entre 9 et 36 kWc
 - o 0.09 €/Wc pour une installation entre 36 et 100 kWcL'électricité qui ne sera pas consommée instantanément sera vendue à EDF obligation d'achat à hauteur de 10cts €/kWh pour les installations inférieures ou égales à 9kWc et 6cts€/kWh pour les installations jusqu'à 100kWc.

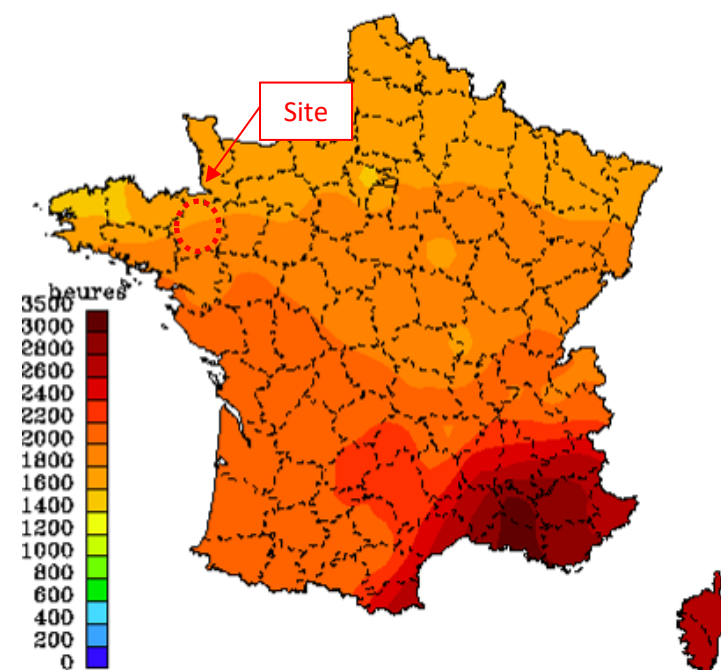
D'autres aides existent également : différentes réductions en provenance de l'Etat (taux de TVA réduit), de la banque (éco-prêt à taux zéro), de l'ANAH, ou encore de la région, département ou commune (offres 2019).

Le gisement solaire local

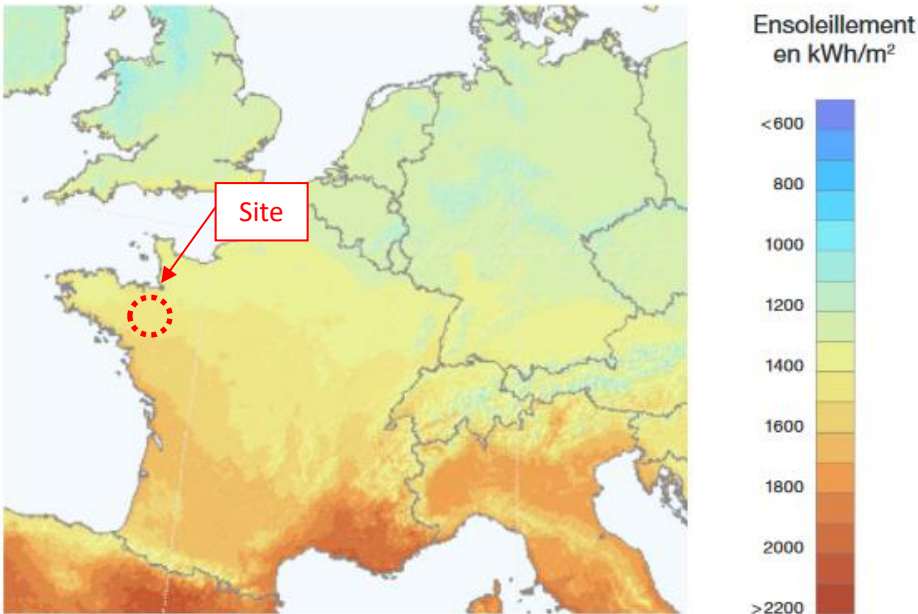
Actuellement, aucun parc photovoltaïque n'existe au sein du territoire de Rennes Métropole. Néanmoins, l'énergie solaire photovoltaïque émerge et se développe de manière ponctuelle sur les toitures de bâtiments, notamment tertiaires ou publics.

En 2014, 13 GWh_{ef} ont été produits à l'échelle de la métropole rennaise à partir de panneaux photovoltaïques. C'est la troisième filière de production d'électricité renouvelables sur la métropole, derrière la cogénération biomasse.

A l'échelle de l'agglomération, Météo France et l'Internaute ont pu calculer sur la ville de Rennes, 1 736 heures d'ensoleillement durant l'année 2017.



Carte d'ensoleillement en France, source : Météo France



Ensoleillement annuel en kWh par m² - Source : JRC-Ispira, Commission européenne

Le gisement solaire local est compris entre 1 100 et 1 200 kWh/m².an, donc un potentiel moyen mais qui reste exploitable.

Les toitures des différents bâtiments représentent des surfaces favorables à l'implantation de panneaux solaires.

Nous avons considéré une orientation sud des capteurs et une inclinaison du plan à 30° par rapport à l'horizontale.

Mois	Energie solaire reçue plan horizontal (Wh/m².j)	Energie solaire reçue plan des capteurs (Wh/m².j)
Janvier	970	1380
Février	1530	1930
Mars	3110	3790
Avril	4430	4800
Mai	5490	5520
Juin	5740	5560
Juillet	5850	5760
Août	4530	4690
Septembre	3070	3430
Octobre	2210	2870
Novembre	1170	1640
Décembre	750	1060

Irradiation solaire à Rennes - Source : Calsol

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. 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.

Station Météo		Rennes					
Latitude du lieu		48°40					
Modules PV	Générique multicristallin	Si	Générique monocristallin	Si	Générique amorphe	Si	Générique CdTe
	Puissance Wc	172	Puissance Wc	217	Puissance 90 Wc		Puissance 75 Wc
Orientation		0° Sud					
Inclinaison		30° / horizontale					
Surface utile		99 m²					
Total énergie produite (kWh/an)		11 096		13 548		5 597	
Total CO2 évité (kg/an)		3 995		4 877		2 015	
Productivité (kWh/kWc.an)		978		946		942	

Estimation de la production d'énergie pour des capteurs solaires à Rennes – Source : Tecsol

Sur le site, 100 m² de panneaux solaires permettraient donc de produire entre 4 744 et 11 096 kWh/an selon la technologie choisie.

Le site est donc globalement favorable à l'implantation de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques.

2.2 L'énergie éolienne

2.2.1 Le grand éolien et le petit éolien

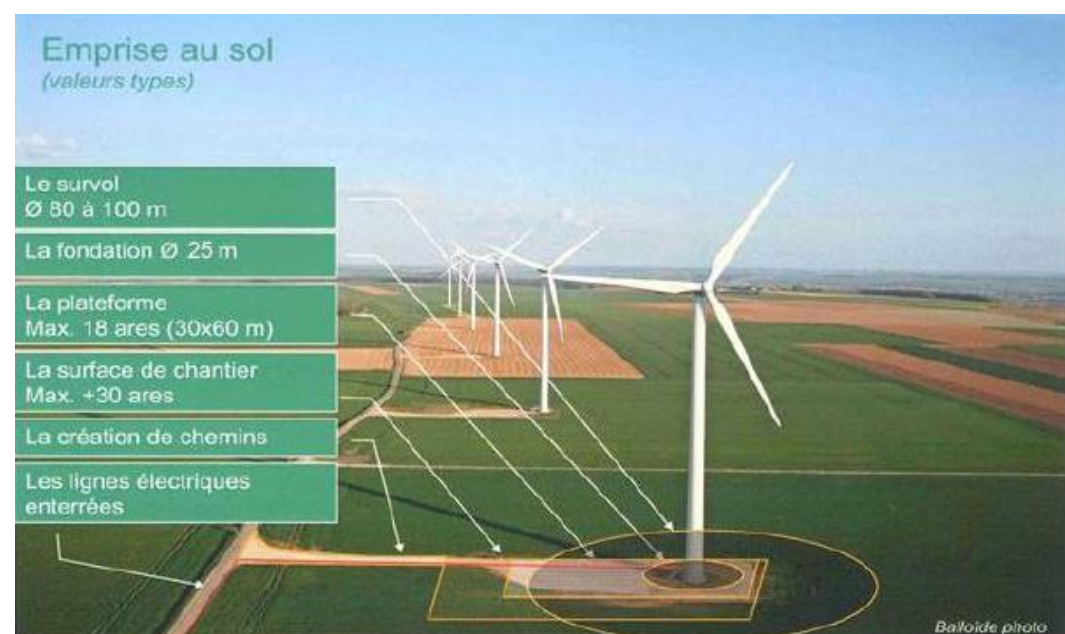
Le grand éolien désigne les aérogénérateurs dont la puissance est comprise entre 1 500 kW et 2 500 kW et d'une hauteur en général supérieure à 50m.

Ils sont destinés à la production d'électricité pour le réseau. Deux types de technologies peuvent être utilisés :

- Les grandes éoliennes à axe horizontal : ce sont les plus répandues et elles se caractérisent par une dimension de plus en plus imposante (ne fonctionnent pas dans des conditions particulières de vitesse de vent)
- Les grandes éoliennes à axe vertical : plus petites que les précédentes, elles ont l'avantage de pouvoir fonctionner dans des conditions climatiques plus défavorables.



Le petit éolien correspond à des éoliennes dont la puissance varie entre 0,1 et 36 kW et leur mât mesure entre 10 et 35 m.



Description de l'emprise au sol d'une éolienne de 2,5 MW – Source : Theolia France

Coût global de la technologie

Le coût d'investissement moyen d'une grande éolienne est d'environ 1 300 à 1 500 €/kW installé, comprenant :

- Le coût du matériel ;
- Le raccordement ;
- L'installation ;
- Les études préalables ;
- Le démantèlement en fin de vie.

Le coût annuel d'exploitation d'une grande éolienne équivaut à environ 2 à 3% du coût d'investissement.

Pour une éolienne de 2 000 kW, cela représente un investissement de 2,8 M€, et un coût d'exploitation de 70 000 € annuels.

Le coût global et les revenus générés d'une installation éolienne dépendent également, comme pour le photovoltaïque du coût de rachat de l'électricité. La France a choisi de soutenir le développement de l'éolien par la mise en place d'une obligation d'achat de l'électricité produite à partir de l'énergie éolienne. Ce tarif est particulièrement favorable au grand éolien en revanche, il ne s'applique pas vraiment aux caractéristiques du petit éolien qui pourtant connaît des coûts d'installation et de production plus élevés. Le tarif de rachat de l'énergie éolienne fixé par l'arrêté du 10 juillet 2006 est d'environ 8,2 c€/kWh pour les dix premières années (suivant l'année de mise en service) ; et entre 2,8 et 8,2 pour les cinq années suivantes (il est fixé en fonction de la durée annuelle de fonctionnement de référence).

Subventions 2019

Concernant le rachat d'électricité, le contrat est conclu pour 15 ans avec le fournisseur d'électricité (après cette période l'électricité peut continuer à être revendue mais au tarif normal de l'électricité du réseau).

Depuis 2008, le tarif de rachat est fixé à 8.4 c€/ kWh pendant les 10 premières années puis entre 2.6 et 8.2 c€/ kWh pendant les 5 années suivantes (déterminé selon le nombre d'heures de production/an).

En revanche, si certaines régions subventionnent le grand éolien, la région Bretagne n'accorde pas d'aides financières pour ce type de projet. En effet, les subventions pour le développement des énergies renouvelables sont essentiellement pour les initiatives de projets participatifs.

2.2.2 L'éolien urbain

Présentation de la technologie

Le petit éolien, ou éolien domestique, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances (de 100 watts à environ 20 kilowatts) montées sur des mâts de 5 à 20 mètres, elles peuvent être raccordées au réseau ou bien autonomes en site isolé. Certaines éoliennes sont de très petite taille, avec pour objectif de pouvoir les installer sur les toitures terrasses des immeubles d'habitation dans les villes, ou sur les toitures des immeubles industriels et commerciaux, dans des gammes de puissances allant de quelques kW à quelques dizaines de kW.

Leur vitesse de rotation est faible et indépendante de la vitesse du vent. Leur puissance varie linéairement avec la vitesse du vent (entre 5 km/h jusqu'à plus de 200 km/h) sans nécessiter la « mise en drapeau » des éoliennes à pales. Elles peuvent être à axe horizontal ou vertical.



Eoliennes urbaines

Coût global de la technologie

Le marché peu développé des éoliennes urbaines rend difficile l'estimation du coût global (installation et maintenance). Selon le site urbawind.org et les premiers retours d'expérience, le coût d'investissement serait pour une petite éolienne à axe horizontal de 7 000 à 10 000 €/kW et pour une petite éolienne à axe vertical de 10 000 à 25 000 €/kW (fabrication et matériaux). Le coût d'installation serait évalué entre 2 200 et 2 900 €/kW et le raccordement à environ 1 000 €/kW (prix dépendant du modèle de l'éolienne).

Pour la phase d'exploitation, le coût de la maintenance serait de l'ordre de 200 à 850 €/an auxquels s'ajoute le coût de changement de certains matériels tels que l'onduleur (environ 1000 €).

Subventions 2019

Depuis le 1^{er} janvier 2016, le Crédit d'Impôt pour la Transition Énergétique (CITE) qui autorisait les particuliers à répercuter 30% du coût de leur rénovation énergétique directement sur leurs impôts n'est plus à l'ordre du jour en ce qui concerne l'installation d'éoliennes, quelque soit leur potentiel énergétique. Il en est ainsi de même pour l'Éco-prêt à taux zéro, un crédit à taux d'intérêt nul bien pratique ordinairement destiné aux propriétaires voulant rénover leur logement.

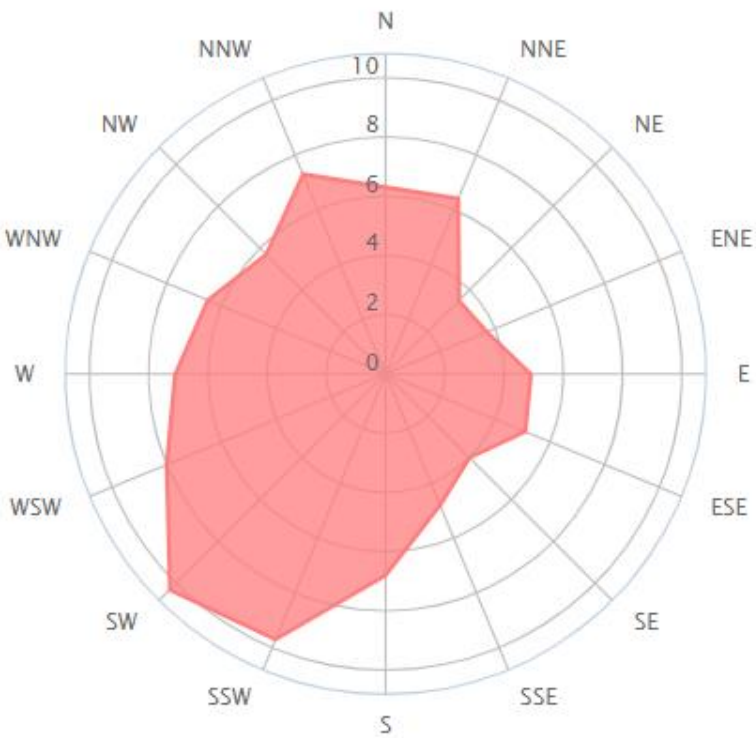
De manière générale l'ADEME supprime progressivement ses aides à l'éolien pour des raisons qui lui sont propres : difficiles d'accès en milieu urbain et produites majoritairement à l'étranger, les éoliennes intéressent peu l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie qui préfère se rabattre sur des solutions plus sûres comme le photovoltaïque, les pompes à chaleur, ou plus simplement les travaux classiques d'isolation.

Seule la TVA à taux réduit de 10% (et non 5,5% comme auparavant puisque les éoliennes ne sont plus éligibles au CITE) est encore d'actualité.

2.2.3 Potentiel éolien local

La distribution du vent sur le site de l'Hôpital Pontchaillou peut être assimilée à celle de la station météo de Rennes Aéroport, compte tenu de la similitude de leur proximité.

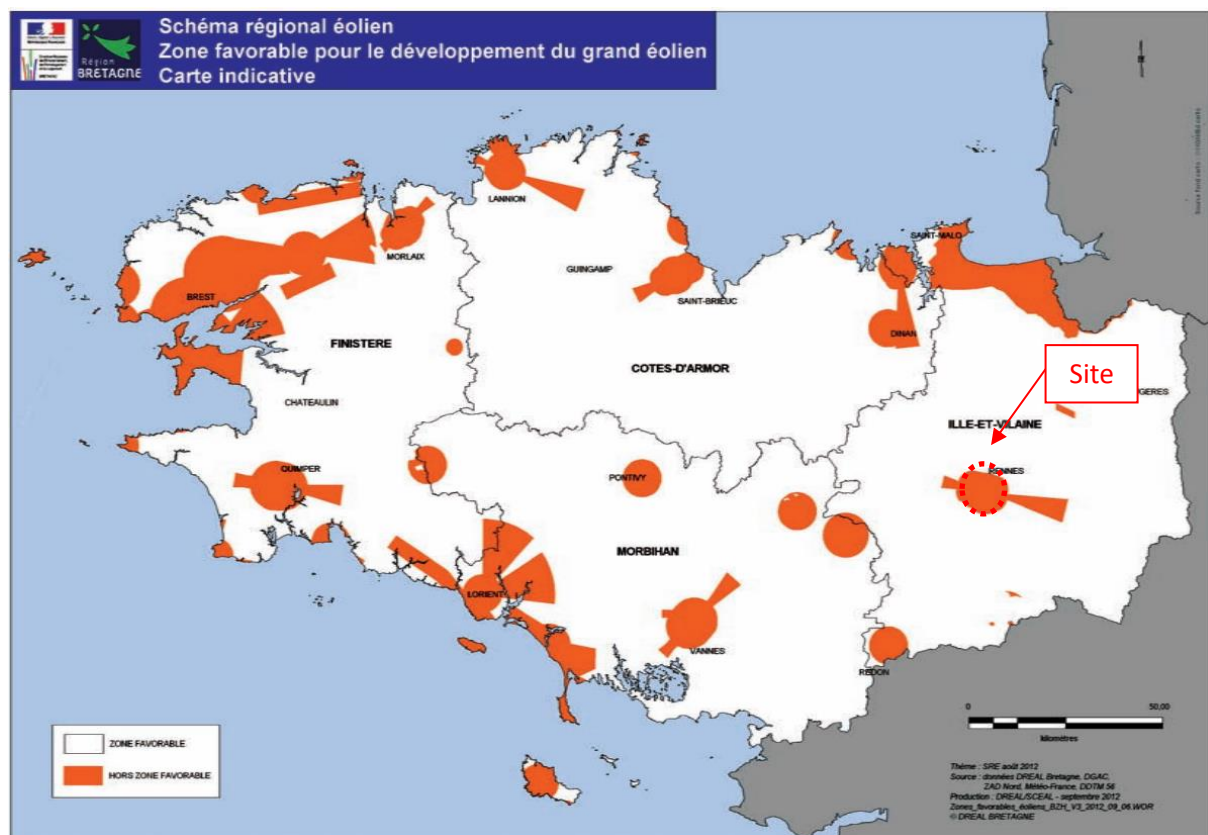
Distribution de la direction du vent en / %



Distribution de la direction du vent sur l'année – Source : Windfinder

Actuellement, 70 % du territoire breton est couvert par un schéma de développement de l'éolien (SDE). Les secteurs géographiques non couverts sont les Abers, la côte de Granit Rose, le Golfe du Morbihan, les Monts d'Arrée. Les objectifs cumulés des SDE représentent un potentiel de 2 457 MW (soit potentiellement 175 ZDE). La puissance installée (dans les SDE) fin 2010 est de 593 MW). Au 1^{er} août 2012, les zones de développement de l'éolien (ZDE) autorisées en Bretagne équivalent à une puissance maximale de 1 827 MW à laquelle s'ajoute la puissance maximale potentielle (ZDE en cours d'instruction) égale à 39 MW.

Le schéma régional éolien de Bretagne propose une carte indicative du potentiel de développement du grand éolien en Bretagne. La ville de Rennes fait partie des zones non favorables au développement du grand éolien.



Zone favorable pour le développement du grand éolien – Source : SRE Bretagne

La productivité d'une éolienne qu'elle soit grande ou petite, verticale ou horizontales, dépend de la vitesse du vent. Pour commencer à fonctionner, sa vitesse ne doit pas être inférieure à 4m/s, une vitesse trop forte en revanche suspendra le fonctionnement de l'éolienne (vitesse maximum dépendant du type d'éoliennes), arrétant la production d'électricité.

Le site de l'Hôpital Pontchaillou se trouve dans une zone où le vent moyen souffle à environ 5 m/s à 40m d'altitude. Les conditions favorables à l'implantation d'éoliennes restent particulièrement faibles pour envisager une production électrique et la rentabilité d'installations éoliennes.

Grand et petit éolien

Un seuil de distance minimum entre les installations d'éoliennes et les habitations a été introduit dans le projet de loi Grenelle 2. Désormais, toute installation éolienne devra se trouver au moins à 500 mètres des zones urbaines d'habitation (définies par les préfets dans les schémas régionaux).

L'éolien urbain

Compte tenu des vitesses de vents plutôt faibles et de la présence d'obstacles pour le passage du vent, le site n'est pas adapté pour l'implantation d'éoliennes urbaines. Si cette technologie est choisie, elle devra être privilégiée en toiture des immeubles à une hauteur conséquente afin d'assurer une prise aux vents optimale et une vitesse de vents suffisante pour que l'éolienne fonctionne correctement et que son installation soit rentable. Aussi, la construction d'immeubles relativement hauts n'est pas prévue sur le site à l'heure actuelle.

Le site ne paraît pas adapté à l'implantation de sources de production énergétique à base d'énergie éolienne.

2.3 L'énergie géothermique

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Il existe un flux géothermique naturel à la surface du globe, mais il est si faible qu'il ne peut être directement capté. En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol (nappes d'eau).

Selon les régions, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte. Ce gradient géothermique varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C. La plus grande partie de la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

2.3.1 Haute énergie

Utilisation des sources hydrothermales très chaudes, ou forage très profond ayant pour principale utilisation la production d'électricité.

La géothermie haute énergie, ou géothermie profonde, appelée plus rarement géothermie haute température est une source d'énergie contenue dans des réservoirs localisés à plus de 1500 mètres de profondeur et dont la température est supérieure à 80°C.

Ce type de ressource est géographiquement très localisé.

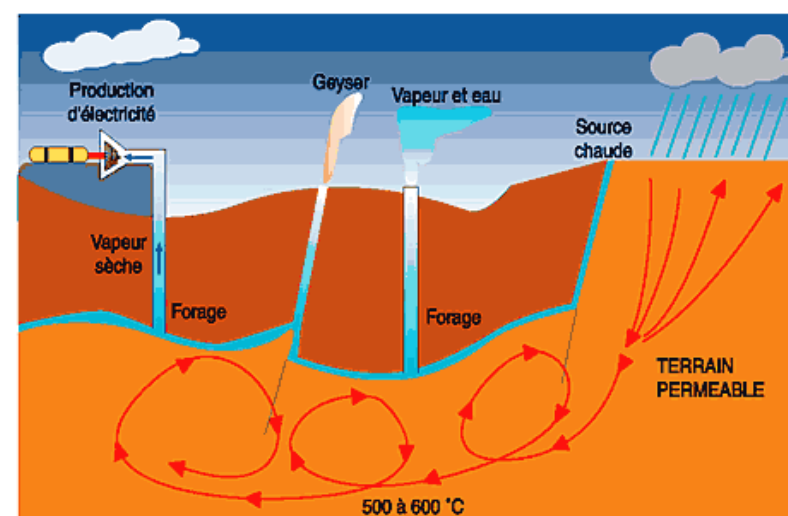


Schéma géothermie haute énergie

Un tel contexte ne se retrouve pas en région Bretagne. La production d'électricité par géothermie haute énergie n'est donc pas pertinente.

2.3.2 Basse énergie

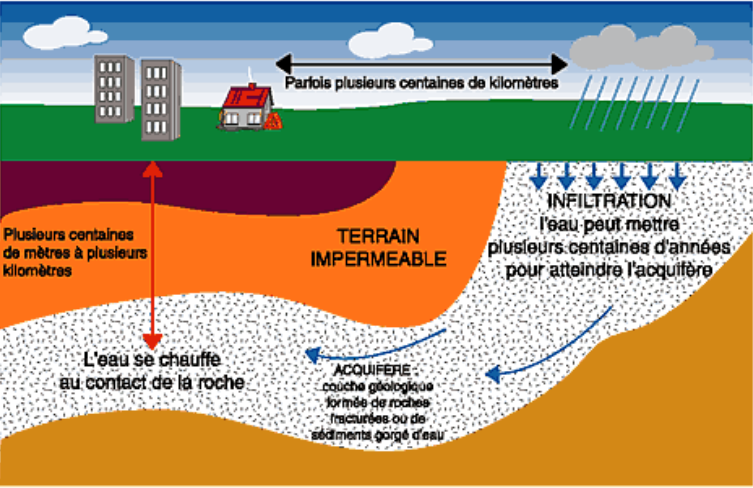
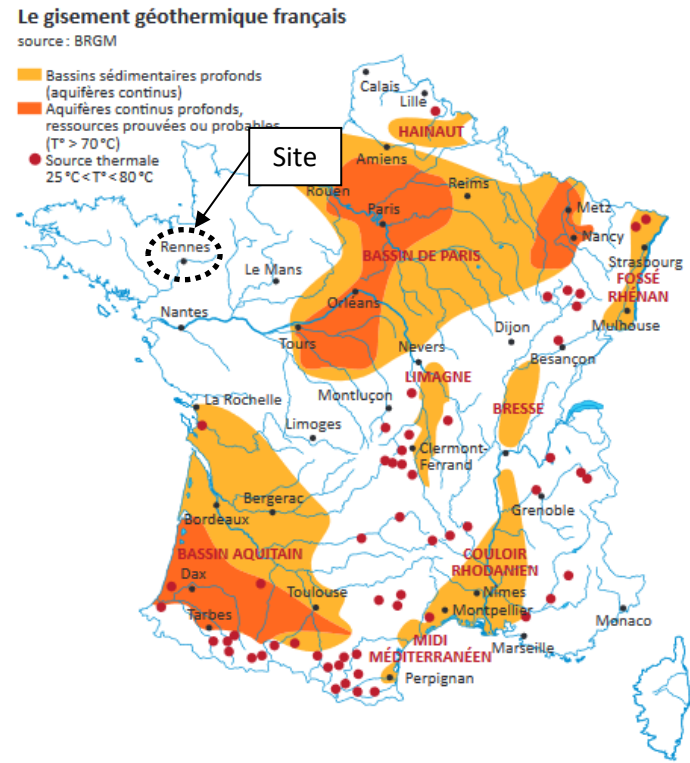


Schéma géothermie basse énergie

Consiste en l'extraction d'une eau chaude (entre 50 et 90°C) dans des gisements situés entre 1500m et 2500m de profondeur. Le niveau de chaleur est directement adapté au chauffage des bâtiments.

Principale utilisation : les réseaux de chauffage urbain.

En France, plus de 30 réseaux de chaleur urbain sont alimentés par géothermie profonde type « Basse énergie ». En particulier en région parisienne, l'eau de l'aquifère profond du Dogger (Jurassique) est captée à environ 2000m de profondeur à une température comprise entre 60 et 80°C.



Carte du gisement géothermique en France - Source : BRGM

Le meilleur aquifère (Trias inférieur) représente un potentiel géothermique faible au niveau du site. La mise en place d'un forage avec une profondeur importante (> 2000m) s'avèrerait alors nécessaire.

2.3.3 Très basse énergie

Pompes-à-chaleur (PAC) sur eau de nappe

Cela concerne les aquifères peu profonds dont les eaux présentent une température inférieure à 30°C. Dans ce cas, la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle d'inertie thermique. La température étant très basse, elle doit être utilisée avec une pompe à chaleur pour atteindre des températures supérieures adaptées au chauffage des bâtiments.

La pompe-à-chaleur permet de prélever la chaleur basse température dans l'eau (boucle primaire) et de la restituer à plus haute température dans un autre milieu via un fluide caloporteur (boucle secondaire).

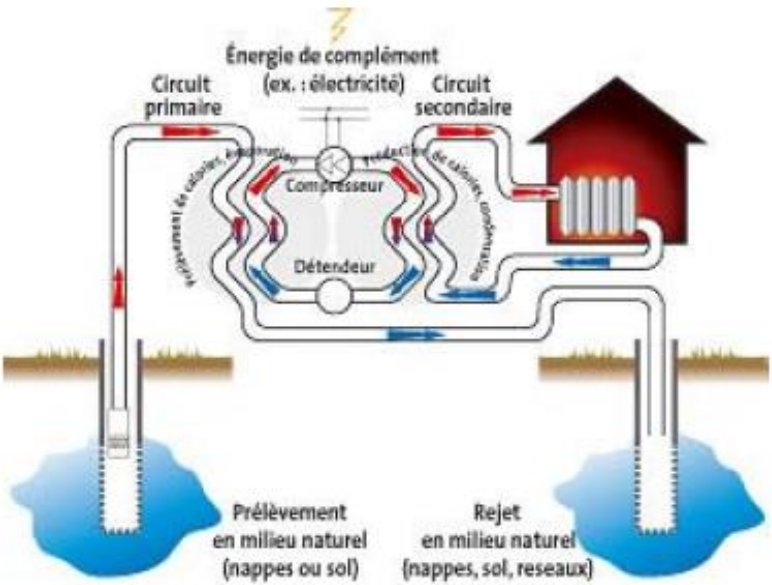


Schéma de principe de fonctionnement d'une pompe-à-chaleur sur eau de nappe

Le système est basé sur la réalisation d'un doublet de forages : un forage de prélèvement et un forage de réinjection. Ainsi, l'intégralité des volumes prélevés sont réinjectés dans l'aquifère. Il n'y a donc aucun impact quantitatif sur la ressource en eau, à partir du moment où les températures de réinjection dans l'aquifère sont respectées. Par inversion de cycle, certaines pompes-à-chaleur sont réversibles et peuvent produire alternativement du chaud et du froid selon les saisons.

Ce dispositif consomme de l'énergie électrique pour faire fonctionner le compresseur, 1 kWh d'énergie électrique consommée peut fournir 3 à 5 kWh d'énergie utile en fonction de la performance de la pompe-à-chaleur. Cette performance est mesurée au travers d'un COP (Coefficient de performance) en mode de production de chaud et d'un EER (Coefficient d'efficacité frigorifique) en mode de production de froid.

Ce mode de production de chaud et de froid à partir de géothermie très basse énergie est utilisé pour le chauffage et le rafraîchissement ainsi que la production d'Eau Chaude Sanitaire pour les maisons individuelles mais également les logements collectifs et bâtiments tertiaires.

Les forages sur eau de nappe sont soumis aux procédures de déclaration et d'autorisation préalables au titre de la « Loi sur l'Eau », selon les volumes annuels prélevés dans la nappe.

Sondes géothermiques

La géothermie très basse énergie peut également exploiter la chaleur du sous-sol par l'installation de capteurs peu profonds horizontaux ou verticaux faisant circuler un fluide caloporteur en circuit fermé. Ces installations nécessitent également l'utilisation d'une pompe-à-chaleur fonctionnant à l'électricité.

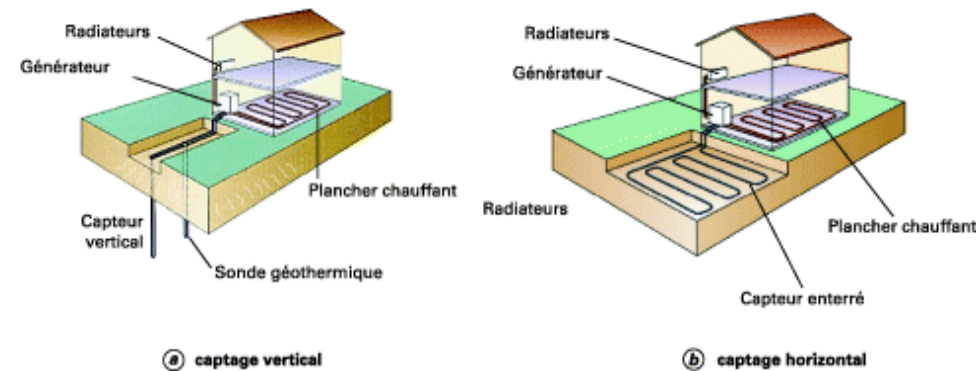


Schéma de principe des sondes géothermiques verticales ou horizontales

Ce dispositif permet de ne pas avoir à mobiliser l'eau des aquifères. De plus, les sondes géothermiques sont moins impactantes pour la stabilité des sols que les prélèvements sur eaux de nappe.

Le coût est d'environ 70 €HT / m linéaire (incluant les frais de raccordement). Il faudra cependant ajouter en plus le coût de la pompe-à-chaleur.

Pieux géothermiques

Dans le cadre de la construction de bâtiments nécessitant des pieux à grandes profondeurs, il est possible d'utiliser ces structures en béton pour capter l'énergie thermique du sol. Les capteurs sont alors installés au cœur des fondations.

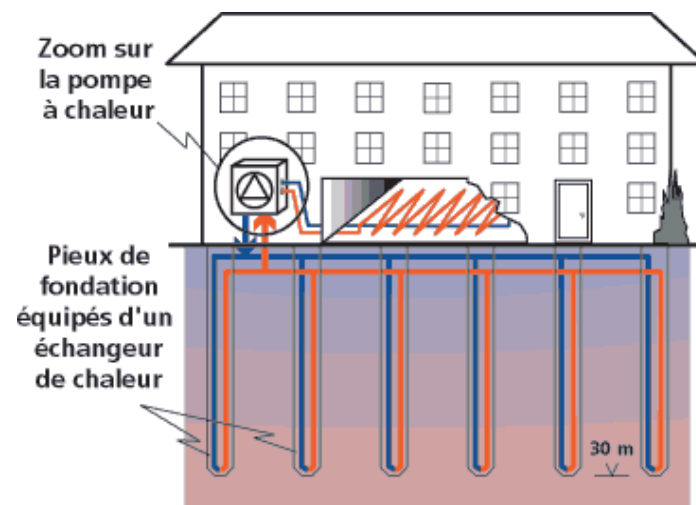


Schéma de principe des capteurs géothermiques intégrés aux pieux

Coût global de la technologie géothermie sur aquifères

Le coût d'un forage seul (hors équipements, réseaux, électricité) varie entre 800 et 2 000€ HT/ML. Pour les autres équipements, le coût varie beaucoup en fonction des pompes, des systèmes ou encore des capteurs utilisés, en considérant par exemple un débit compris entre 60 et 100 m³, le coût peut varier de 25 000 à 70 000 € HT. S'ajoute à cette estimation le coût de la PAC d'environ 300€ HT du kW et celui des études de faisabilité qui s'élève à un montant compris entre 12 000 et 20 000€.

Le coût de la maintenance pendant la phase d'exploitation semble varier entre 1 500 et 3 000€ HT auquel s'ajoute tous les 10 à 15 ans des examens endoscopiques des forages estimés à 2 500 € HT et un examen des pompes pour 8 000€. En ce qui concerne les pompes à chaleur, le coût de maintenance se situe entre 4 500€ HT/an pour une pompe de 100 à 200kW et 15 000€ HT/an pour une pompe de 800 à 1 000kW.

Subventions 2019

La productivité et la pérennité de l'aquifère n'étant jamais sûre à 100%, les organismes en liaison avec la géothermie ont mis en place un outil financier de garantie. La garantie Aquapac® a été initiée en 1983 sous l'égide de l'ADEME (AFME à l'époque), d'EDF et du BRGM. Elle est destinée à favoriser le développement des opérations de pompes à chaleur sur nappe aquifère. Pour cela, elle offre une double garantie portant sur les ressources en eau de ces nappes aquifères :

- La garantie « recherche » couvre le risque d'échec consécutif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante pour fournir le débit d'eau nécessaire. Le taux de cotisation pour cette garantie est désormais de 5% du montant des ouvrages garantis en recherche.
- La garantie « pérennité » couvre le risque de diminution ou de détérioration de la ressource, en cours d'exploitation. La durée de cette garantie est de 10 ans, et le taux de cotisation pour cette garantie est de 4% du montant des ouvrages garantis.

Le taux de TVA est réduit à 5.5 % pour une pompe à chaleur géothermique. La fourniture et l'installation d'une pompe à chaleur bénéficient d'un taux de TVA réduit à 5.5 %, (depuis le 1er janvier 2014) si l'entreprise qui vend le matériel en assure aussi la pose. Les travaux doivent être réalisés dans des habitations achevées depuis plus de deux ans.

Autres soutiens financiers

Crédit d'impôts

La pompe à chaleur géothermique fait partie des installations éligibles au crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE), qui permet de déduire de l'impôt sur le revenu 30% des dépenses réalisées pour les travaux d'amélioration de la performance énergétique.

Eco-prêt à taux 0 % pour une pompe à chaleur géothermique

Pour obtenir l'éco-prêt à taux 0%, il faut réaliser au moins une phase de travaux visant à améliorer l'efficacité énergétique d'un logement individuel. La pose d'une pompe à chaleur se combine

particulièrement bien avec d'autres types de travaux tels que la pose d'une chaudière à condensation etc...

Potentiel géothermique du secteur de l'Hôpital Pontchaillou

Les géothermies haute énergie et moyenne énergie nécessitent des contextes géologiques bien particuliers (présence d'une ressource à haute température) qui ne sont pas présents sur le territoire breton. De plus, ces technologies nécessitent des investissements importants et sont réservés à des projets d'ampleur (réseau de chaleur ou production d'électricité). La mise en œuvre employée de ce genre de système n'est envisageable que pour des puissances de plusieurs MW. Ces solutions ne sont donc pas adaptées au projet étudié.

La géothermie basse énergie demande également des contextes géologiques bien particuliers, absents de la région bretonne.

En Bretagne, la majorité des installations géothermiques utilisent la géothermie très basse énergie (TBE). Elle est définie par l'exploitation d'une ressource présentant une température inférieure à 30°C, qui ne permet pas, dans la plupart des cas, une utilisation directe de la chaleur par simple échange. Elle nécessite donc la mise en œuvre de pompes à chaleur qui prélèvent cette énergie à basse température pour l'augmenter à une température suffisante pour le chauffage.

Le concept de géothermie très basse énergie recouvre des applications qui vont du chauffage de maisons individuelles jusqu'au chauffage par réseau de chaleur. Ce type de géothermie se montre particulièrement adapté au chauffage de logements collectifs ou de locaux du secteur tertiaire (hôpitaux, administration, centres commerciaux...).

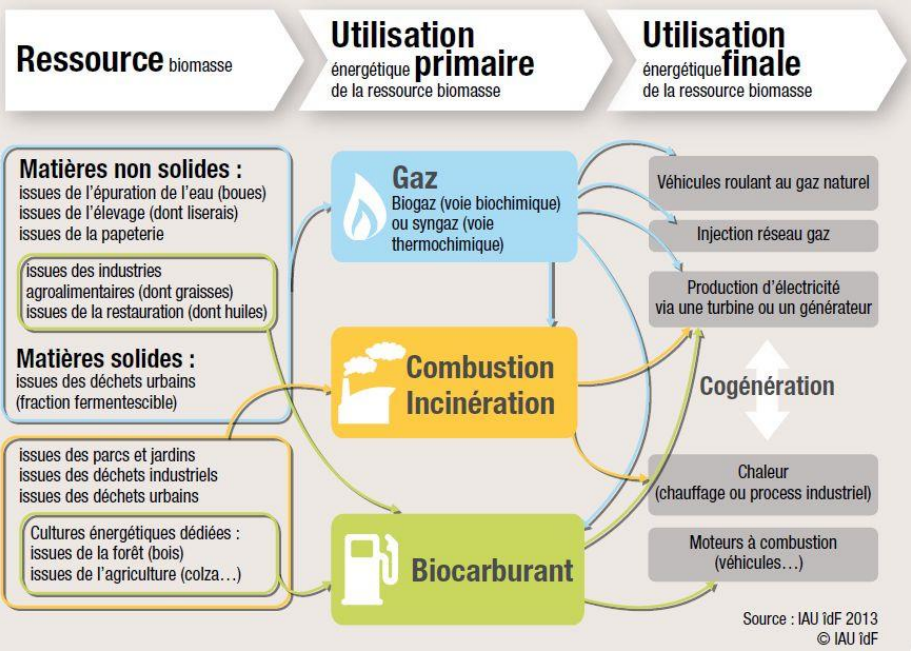
Le potentiel géothermique très basse énergie du site est à déterminer, en l'absence de données du BRGM.

L'éventail de technologies disponibles pour l'exploitation du potentiel géothermique peut rendre disponible la ressource pour le projet.

2.4 La biomasse

2.4.1 Le gisement biomasse

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.



Source : ADEME

Le choix de valoriser la ressource biomasse doit se faire en tenant compte de la distance à parcourir pour aller la chercher. Les valeurs données pour déterminer la ressource seront donc représentatives de la ressource présente dans un rayon de 150 km autour du site et proviendront des informations disponibles à l'échelle régionale. Au-delà cette distance, les coûts et les émissions engendrées par le transport font de cette solution, une option non rentable et non viable économiquement et écologiquement.

2.4.2 Bois-énergie

Le bois-énergie est une ressource naturelle et renouvelable, qui permet de valoriser des sous-produits ou déchets locaux.

Le gisement bois-énergie est composé de divers produits issus de l'exploitation forestière ainsi que des matières organiques issues de l'industrie :

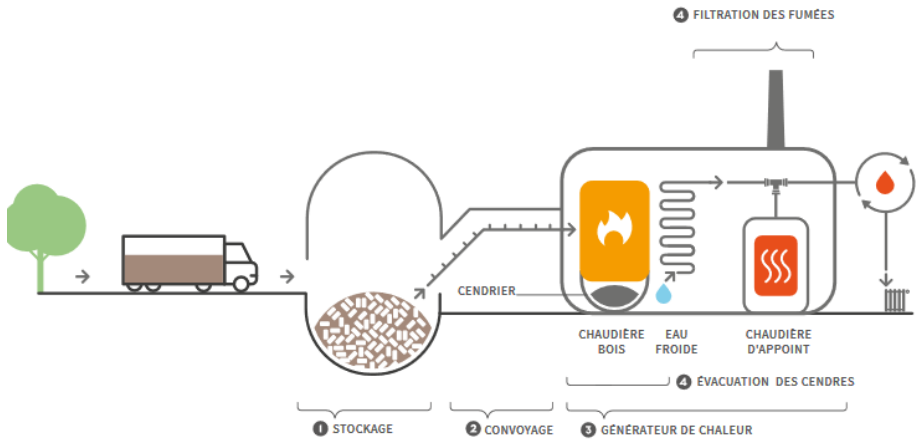
- la ressource forestière (boisement, taillis, rémanents d'exploitation...) et les résidus d'égavage ;
- les sous-produits de l'industrie du bois (sciures, copeaux, écorces...) ;
- les bois de rebut non souillés (palettes, cagettes...).

La disponibilité de la ressource est très dépendante de la distance entre le lieu de production et d'exploitation, ainsi que des infrastructures disponibles permettant son transport.

Le bois énergie peut être utilisé :

- 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).



1 LE SILO DE STOCKAGE

Le combustible bois livré en chaufferie est déchargé dans le silo de stockage. Il permet d'alimenter la chaudière en combustible. On distingue différents types de silos : enterré, de plain-pied, en conteneur, pour camion souffleur.

2 LE CONVOYAGE

L'alimentation automatique d'une chaufferie bois permet d'acheminer le combustible depuis le silo jusqu'au foyer. Elle comprend trois étapes :
- le dessilage du combustible
- le convoyage
- l'introduction dans le foyer

3 GÉNÉRATEUR DE CHALEUR

C'est l'enceinte dans laquelle l'énergie contenue dans le bois est libérée et transmise au fluide caloporteur. Il est généralement composé de deux éléments principaux :
- le foyer
- l'échangeur de chaleur

4 FILTRATION DES FUMÉES ET ÉVACUATION DES CENDRES

Une installation de combustion biomasse génère deux types de résidus : les cendres sous foyer et les cendres volantes. Les premières tombent dans un cendrier situé sous la chaudière et sont extraites par voie sèche ou voie humide. Leur valorisation agronomique permet de restituer ces éléments au sol afin qu'ils soient réutilisés par les arbres ou les cultures. Les cendres volantes, également appelées particules de filtration des fumées émanant des systèmes de dépoussiérage.

Mise en place d'une chaufferie biomasse – Source : Ademe

Cout global de la technologie

Le coût d'investissement d'une chaufferie biomasse dépend essentiellement de la taille de la chaufferie, du réseau et des sous stations. Le ML de réseau coûte entre 600 et 800€ HT et chaque sous station à un coût d'investissement de 20 000€ HT. En moyenne, le coût de la chaufferie bois individuelle serait compris entre 600 et 800€ HT/kW biocombustibles.

Au coût d'investissement s'ajoute celui des combustibles : plaquettes industrielles entre 25 et 30€/MWh, granulés entre 25 et 36€/MWh et bois de rebut entre 7 et 13€/MWh. Bien que ces prix semblent beaucoup moins importants que ceux pour une chaufferie gaz (57€ HT/MWh), les coûts d'exploitation des chaufferies biomasses sont plus conséquents (personnel d'exploitation plus nombreux, maintenance plus régulière...). Néanmoins, ces coûts sont moins soumis à la volatilité des prix des combustibles.

Subventions 2019

Le Fonds Chaleur géré par l'Ademe permet de financer la mise en œuvre de systèmes pour la production de chaleur à partir des énergies renouvelables (destiné à habitat collectif, collectivité et entreprises). Cependant pour être éligible à cette aide, l'installation doit respecter certains critères qui sont :

- Être une installation collective, industrielle ou agricole ayant une production minimum de 1200 MWh/an d'énergie biomasse sortie chaudière,
- Avoir un approvisionnement régional de 50%,
- Avoir un système de traitement des fumées performant,
- Le rendement thermique à puissance nominale doit être supérieur à 85%,
- Assurer une performance énergétique et environnementale du projet,
- Être approvisionné partiellement ou totalement en plaquettes forestière.

Les aides forfaitaires se calculent de la manière suivante :

Production annuelle (MWh/an)	Aide en €/MWh (20 ans)
jusqu'à 3000	8.2
3001 à 6000	5.9
6001 à 12000	2.8
> 12000 *	1.4

2.4.3 Le bois énergie – cogénération

Présentation de la technologie

Ce système permet à la fois de produire de la chaleur et de l'électricité. C'est une alternative intéressante à l'énergie solaire et éolienne. La chaleur issue de la combustion est utilisée pour le chauffage mais aussi, dans le cas de la cogénération, pour alimenter une turbine à vapeur qui va produire de l'électricité. Il existe des turbines à vapeur d'une puissance de quelques dizaines de kW à plusieurs centaines de MW, avec des vitesses de rotation allant de 5 000 à 15 000 tr/min et des rendements électriques de 12 à 20% pour les modèles à condensation. La quantité de combustible nécessaire pour les installations de puissance importante, pousse à diversifier les sources d'approvisionnement.

L'utilisation de petite turbine possédant une puissance minime s'apparente à la technologie de la micro-cogénération biomasse. Si actuellement, cette technologie est encore peu mature et présente des coûts d'investissement importants, elle représente une réelle opportunité pour le développement des énergies renouvelables.

Il existe 3 familles de cogénérations, permettant de délivrer des puissances électriques plus ou moins importantes et de s'adapter à une grande variété de projets. On parle de micro cogénération lorsque la puissance nominale est inférieure à 36 kWe et de mini cogénération lorsque celle-ci est comprise entre 36 et 250 kWe.

Il est à noter que les systèmes de mini et micro cogénérations peuvent être installés à l'échelle de bâtiments. En revanche, les systèmes de cogénération à moteur Stirling (éco générateur) sont plutôt utilisés à l'échelle individuelle (adaptée pour des maisons individuelles).

Cout global de la technologie

Les coûts d'investissement sont de l'ordre de 1,8 millions d'euros par MW électrique installé. Le temps de retour sur investissement couramment observé est de 8 à 10 ans.

Les coûts annuels d'exploitation sont généralement de l'ordre de 1 à 3% des coûts d'investissement pour les installations à contrepression et de l'ordre de 4 à 5% pour les ensembles à condensation.

Subventions 2019

Les aides à l'investissement pour ce type d'installation sont allouées après une étude au cas par cas. Les aides de l'ADEME sont plafonnées à 30% sur le coût des travaux. En ce qui concerne la micro-cogénération, les aides sont du même ordre, 20% maximum du coût des travaux pour les aides de la région et 40% maximum du coût éligible pour le financement de l'ADEME (aides accordées ou non selon le degré d'innovations de l'opération, leur dimension de communication...).

Un tarif de rachat préférentiel pour l'électricité produite par un système de cogénération a été mis en place. Il est de l'ordre de 18c€/kWh dont 3c€ dépendent de la valorisation énergétique de l'installation. Le taux de valorisation de la chaleur produite est souvent déterminant pour la rentabilité d'un projet. Entre 30 et 35% de l'énergie primaire est valorisée en électricité, le reste est de l'énergie thermique.

Les installations de cogénération bois représentent 40% de la chaleur biomasse aidée par le Fonds Chaleur.

2.4.4 Ressource forestière

Les données générales sont issues des inventaires forestiers effectués à l'échelle des anciennes délimitations de régions, dans l'attente de nouvelles données propres à la fusion des régions.

Avec un taux de boisement moyen de 13 %, la région Bretagne est peu forestière au regard du taux de boisement moyen du territoire métropolitain de 29,2 %. Des quatre départements bretons, le Morbihan est le plus boisé avec un taux de boisement de 17 %. La surface forestière régionale représente 357 000 ha dont 114 000 ha dans le Morbihan

D'après l'étude sur la disponibilité forestière pour l'énergie et les matériaux (ADEME, 2015), la disponibilité de la ressource en France est assurée et les capacités de la forêt française permettent une augmentation importante de la récolte à l'horizon 2035. En tablant sur un statu-quo au niveau de la gestion des forêts, la disponibilité de la ressource pour du bois-énergie pourrait atteindre plus de 2 300 m³ par an et être sensiblement augmentée en cas mise en place de mesures de gestion dynamique de la ressource.

Les besoins en matière première pour le bois énergie progressent depuis quelques années. Le nombre de chaufferie bois en fonctionnement ou en cours de construction est significatif.

2.4.5 Le bois déchet

Actuellement, les déchets sont une source d'énergie bois utilisée en France. Ils comprennent : le bois d'élitage et d'abattage, les composts et les bois en fin de vie. Les espaces verts du territoire régional, communal et les voiries représentent donc un potentiel énergétique non négligeable. En effet, leur entretien dégage des volumes de déchets verts dont la fraction ligneuse peut être extraite et intégrée à la filière énergétique.

L'évaluation de ce potentiel doit faire l'objet d'une étude in-situ qui permettra de déterminer les surfaces et les linéaires à potentiel de productions.

2.4.6 Approvisionnement

La région Bretagne compte de nombreux distributeurs de combustible bois énergie. Un groupement d'entreprises de la filière bois en Bretagne a été créé en 1994 pour promouvoir la filière. Les principaux distributeurs pour des chaufferies collectives proches du site du projet sont les suivants :

- Bois Energie Maine Atlantique
- Bois Energies Ouest Environnement
- Nass&Wind Bois Energie

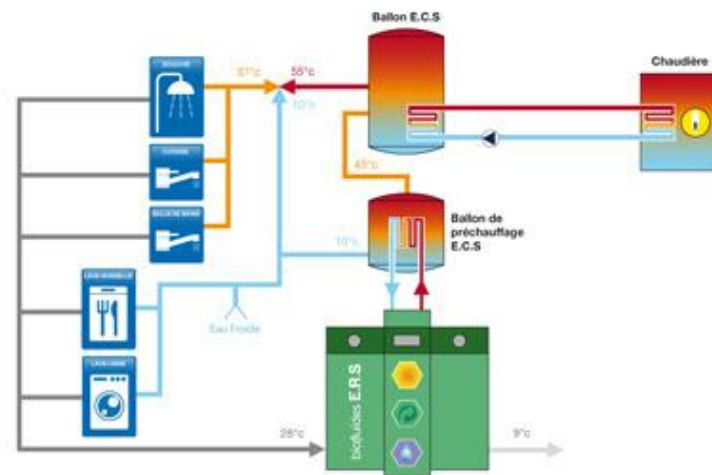
Source : Abibois

2.5 La récupération de chaleur des eaux domestiques

2.5.1 Récupération de chaleur sur les eaux grises

La récupération de chaleur sur les eaux domestiques consiste au remplissage de ballons d'eau chaude à l'aide d'eau préchauffée. L'eau est préchauffée au contact des eaux grises et usées, via un échangeur de chaleur.

Des études complémentaires sont nécessaires pour quantifier le potentiel de récupération de l'énergie des eaux grises. Le potentiel thermique des eaux usées est en tous les 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.



Fonctionnement de la technologie à eaux grises

Coût global de la technologie

Le coût d'investissement global pour l'installation de ce type de technologie est compris entre 1 800€ et 2 000€ pour un système de type Recoh HT. Ce prix englobe les coûts de système, de matériel associé et de la main d'œuvre. L'entretien et la maintenance ne nécessite que de faibles coûts.

Subventions 2019

L'Ademe peut soutenir l'installation d'équipements de captage de la chaleur des eaux usées à travers le Fond Chaleur. Un exemple est celui de la pompe à chaleur sur eaux usées de la résidence Les Nouveaux Chartreux à Marseille (13), ou bien d'une résidence à Courcouronnes (91) dont le coût s'est élevé à 89 k€ et pour laquelle l'ADEME a contribué à hauteur de 39 k€.

2.5.2 Récupération de chaleur sur les eaux usées

Les retours d'expérience montrent qu'un mètre de canalisation permet de produire de 2 à 8 kW de puissance de chauffage. Les retours d'expérience du fonctionnement du réseau de chaleur de l'éco-quartier Boule/Sainte-Geneviève situé à Nanterre (92) en Ile-de-France sont concluants au regard de cette technologie.

A l'échelle d'un quartier ou d'une ville, la récupération de chaleur sur les eaux usées consiste à récupérer l'énergie thermique des eaux usées circulant dans les conduites. Chacune des canalisations,

alimentées par les différents bâtiments du quartier, est équipée d'un échangeur de chaleur qui récupère l'énergie, grâce au fluide caloporteur, pour ensuite l'acheminer vers des pompes à chaleur.

Pour qu'une installation de ce type puisse être envisagée, le réseau doit répondre aux conditions suivantes :

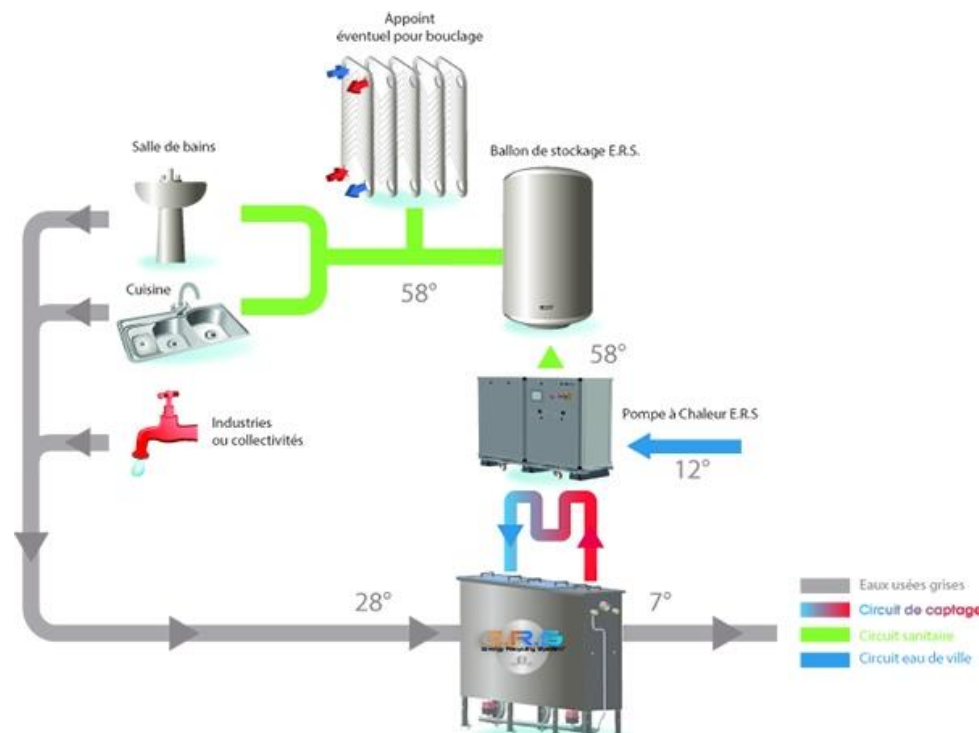
- Débit supérieur à 15 l/s et température supérieure à 10°C ;
- Distance maximum entre l'échangeur et la chaufferie inférieure à 300 mètres ;
- Tronçons rectilignes sur au moins 100 mètres (grandes installations) et de diamètre minimum de 40 cm (réseau neuf) ;
- Puissance minimum de l'installation = 150 kW (environ 50 logements = densité minimum).



Principe de récupération de chaleur sur les eaux usées (degré bleu)

A l'échelle d'un bâtiment, il existe également des dispositifs de filtration et récupération de chaleur directement sur les eaux usées en sortie de bâtiment. Toutefois, ce dispositif est plus particulièrement adapté à un ensemble de logements d'échelle suffisamment importante pour assurer une production de chaleur régulière.

Les calories présentes dans les eaux usées ménagères sont captées puis réinjectées instantanément dans le réseau local afin de produire 80 à 100% des besoins en eau chaude sanitaire (ECS). La cuve d'échange thermique récupère et transfère l'énergie vers la pompe à chaleur. À l'intérieur de cette cuve sont placés des échangeurs dans lesquels circule un fluide caloporteur. Les eaux grises entrent dans la cuve à une température moyenne comprise entre 28 et 32°C et en ressortent à 9°C. Les calories prélevées dans la cuve d'échange thermique sont transférées à la pompe à chaleur.



Principe de récupération de chaleur sur les eaux usées à l'échelle d'un bâtiment – Source : Biofluides

Des technologies existent également à l'échelle de chaque logement (type Powerpipe).



Installation de récupération de chaleur sur évacuation d'eaux usées - Source : Powerpipe

Cout global de la technologie

Le coût d'investissement d'une installation comme celle-ci est très dépendant des caractéristiques du secteur étudié. Les coûts sont donc donnés à titre d'exemple pour la couverture des besoins en ECS des immeubles de logements dont les besoins énergétiques sont estimés à 5 000 MWh (2 500 MWh/an soit 50% des besoins).

Les conduites de diamètre 1 500 mm sont équipées sur 135 ml d'échangeurs (réseau à 13°C pour un débit de 100l/s) :

- Coût d'investissement estimé à 1,2M€ (PAC et autres systèmes nécessaires inclus) ;
- Coût d'exploitation estimé à 334 000€ pour cette installation degrés bleus (combustible d'appoint nécessaire (gaz), électricité pour la PAC et les coûts de maintenance (chaufferie...) sont inclus).

Subvention 2019

L'ADEME subventionne ce type d'installation par le biais du « Fonds Chaleur ». Celui-ci est calculé en fonction du nombre de tonnes équivalent pétrole (TEP) évitées. Une TEP est équivalente à 11 630kWh. Cette aide est soumise à certaines conditions.

Potentiel du site

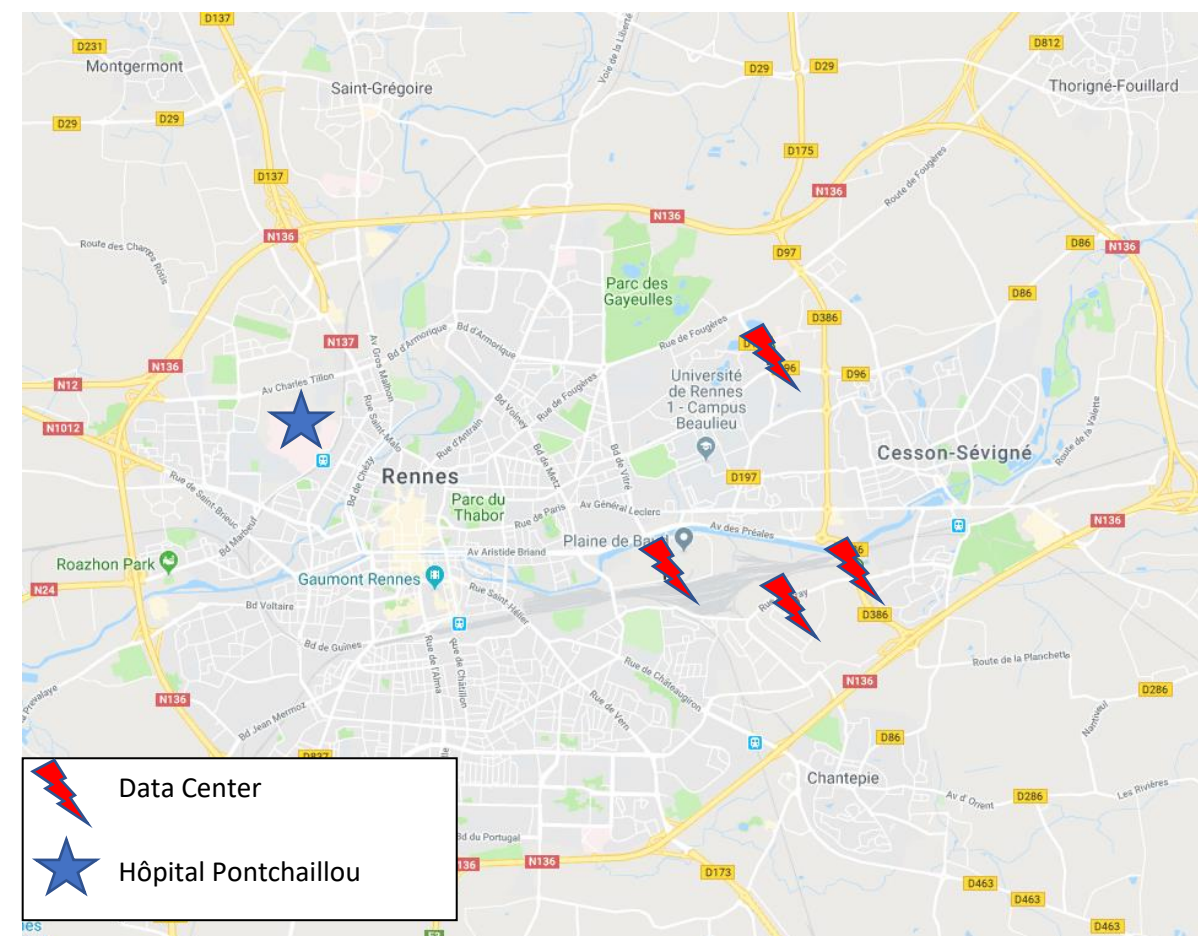
Le potentiel thermique des eaux usées est bien adapté aux besoins des bâtiments collectifs. Toutefois, le potentiel thermique des eaux usées est trop insuffisant pour les bâtiments tertiaires.

2.5.3 Récupération de chaleur fatale industrielle (ou data center)

La chaleur fatale est la chaleur produite lors d'un processus, mais ne correspondant pas à l'objet premier de ce dernier, et qui est, de fait, perdue sans être utilisée. Elle peut provenir de sources diverses : industries, usines d'incinération, stations d'épuration, data-centers...

Territoire fortement industrialisé, le territoire lunévillois recense plusieurs industries dont la chaleur fatale pourrait être réutilisée.

La carte des data-center de la région montre qu'aucune de ces installations n'est située à proximité immédiate du site de l'hôpital Pontchaillou.



Localisation des datacenter aux alentours de l'Hôpital Pontchaillou - Source : <http://www.datacentermap.com/>

2.6 Les autres technologies existantes

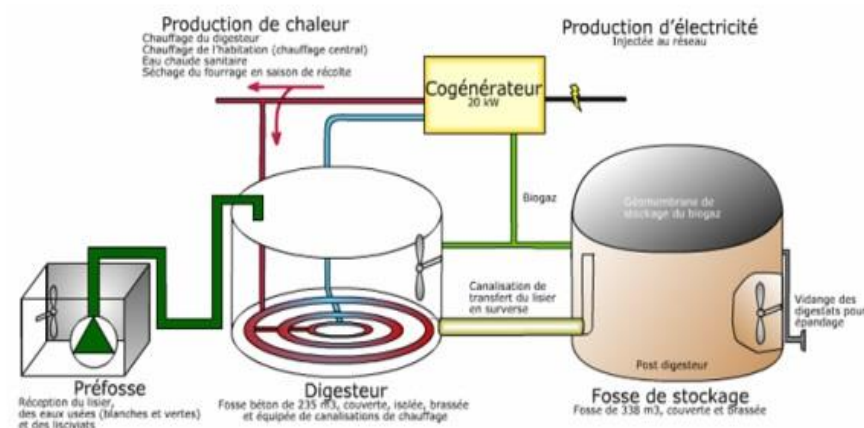
2.6.1 Le biogaz et les biocarburants

Le biogaz, issu de la méthanisation ou de la fermentation des déchets organiques, peut être utilisé pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité.

Les substrats organiques permettant la méthanisation peuvent se décomposer en trois grandes familles :

- Les effluents d'élevage : fumier, paille ; cultures...
- Les industries-agroalimentaires : co-produits de transformation provenant des abattoirs, des laiteries, des conserveries...
- Les collectivités : déchets verts, déchets ménagers, boues d'épuration...

Une suite de réactions biologiques conduit à la formation de biogaz (contient 2/3 de méthane et 1/3 de gaz carbonique) et d'un digestat (répandu sur les cultures comme engrais). Pour augmenter les rendements, la matière est placée à l'intérieur d'une grosse cuve (le digesteur) fermée, chauffée, brassée sans entrée d'air et à l'abri de la lumière. Elle peut être sèche ou humide.



Principe de fonctionnement de la méthanisation

Une installation de méthanisation est composée principalement d'un équipement de séparation des impuretés, d'un mélangeur/malaxeur pour que la matière organique soit introduite de façon homogène dans le digesteur, du digesteur, d'un système de brassage, d'un système d'extraction et de pressage du digestat et d'un système de traitement, de stockage et de valorisation du digestat.

Le digesteur est un réacteur hermétique, imperméable à la lumière et maintenu à température constante (35°C pour les bactéries mésophiles ou 55°C pour les bactéries thermophiles) à laquelle la digestion anaérobie se produit. La digestion mésophile dure environ 30 à 40 jours, tandis que la digestion thermophile est plus rapide, durant une quinzaine de jours. Si la digestion thermophile est plus rapide et présente un meilleur rendement de méthanisation par tonne de matière digérée, les installations nécessaires sont plus coûteuses et plus délicates. Les coûts d'investissement rapportés à la puissance électrique sont toutefois très proches.

Echelle d'exploitation

Le biogaz produit peut être valorisé dès lors qu'il est transformé en biométhane (biogaz épuré) et injecté dans le réseau de gaz naturel. L'intérêt de l'injection est de pouvoir utiliser une énergie renouvelable en utilisant un réseau de distribution déjà présent sur le territoire.

Depuis novembre 2011, il est désormais possible d'injecter du biométhane dans le réseau de distribution GRDF. Pour valoriser cette énergie « verte » injectée dans le réseau, un système de garanties d'origine a été mis en place afin que chaque consommateur, individuel ou collectif, puisse acheter du gaz garanti 100% biométhane, donc 100% Energie Renouvelable.

Coût global de la technologie

Les coûts à l'investissement sont de l'ordre de 850 à 1 000€/kW pour une installation de 30 kWe. La rentabilité du projet dépend de la valorisation du biogaz (vente d'électricité, valorisation de la chaleur ou injection d'un biogaz épuré dans un réseau de distribution) et de la rémunération liée au traitement de déchets extérieurs. La pérennité et le montant de cette rémunération peuvent varier sous l'effet de la concurrence locale.

Les données économiques pour les unités de méthanisation fonctionnant avec les boues d'épuration sont peu nombreuses et disparates selon la capacité des unités (exprimée en équivalents-habitants et en €/Tonne de matière sèche) :

- Pour une capacité < à 10 000EH : 2 000 à 3000€/Tonne de MS ;
- Pour les capacités supérieures à 10 000EH : 500 à 3000€/Tonne de MS (ADEME).

Potentiel local

Le potentiel énergétique des effluents en région Bretagne prend en considération tous les élevages (bovin, équins, caprins, ovins et volailles) présents sur le territoire régional.

La mise en œuvre d'une unité de production de biogaz est très dépendante du lieu de production de la matière première. Ce type d'installation nécessite des emprises foncières conséquentes. Toutefois, le site se trouve à proximité de grands espaces ruraux et d'exploitation agricole.

Cette solution peut être étudiée sous réserve d'études complémentaires et dans l'attente de l'évolution d'un projet qui regrouperait des espaces de production agricole, des activités de transformation, et des espaces de ventes directes. Les besoins en chaleur sont en revanche limités.

2.6.2 Aérothermie

Principe de fonctionnement

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 nécessite l'utilisation d'un système de pompes à chaleur, qui peut être électrique ou à absorption gaz. La fluctuation des températures de l'air extérieur influence la performance des systèmes de pompes à chaleur. En effet par temps froid, les besoins de chauffage sont maximum alors que la quantité d'énergie pouvant être extraite dans l'air est a contrario minimale, d'où une baisse de la performance.

Dans le cas de pompes à chaleur gaz à absorption, l'impact des températures extérieures est cependant moins important que pour des pompes à chaleur classiques, puisqu'une partie de la chaleur est fournie par la réaction d'absorption. Les PAC gaz à absorption permettent aussi de produire de l'eau chaude sanitaire à 60 / 65 °C, avec des performances supérieures à celles des pompes à chaleur électriques.

Echelle d'exploitation

Les PAC aérothermiques sont utilisables à l'échelle du bâtiment. Plusieurs systèmes de pompes à chaleur aérothermiques existent aujourd'hui. Dans le cas des PAC gaz à absorption, des modules de 40 kW sont disponibles. Cette technologie est donc plus adaptée pour des bâtiments collectifs.

Potentiel aérothermique local

Etant donné le climat continental que l'on retrouve sur le territoire local, bénéficiant de fortes variations de températures de l'air, l'utilisation de pompes à chaleur gaz à absorption peut être plus pertinente. En effet, la performance énergétique de ce système sera moins impactée que dans le cas de pompes à chaleur électriques.

2.6.3 L'énergie hydrolienne

Présentation de la technologie

L'hydrolienne doit être placée dans l'axe des courants afin d'actionner les pales du ou des rotors (courant minimum 1,5 m/s). L'énergie mécanique, produite par la rotation des pales est transformée ensuite en énergie électrique à l'aide d'une turbine. Elle est alors dirigée vers un générateur pour être ensuite acheminée jusqu'au réseau d'électricité terrestre par l'intermédiaire d'un câble relié au rivage. Différents types d'hydroliennes existent sur le marché mais le principe de fonctionnement est similaire.



Hydroliennes implantées dans un fleuve

Coût global de la technologie

Le manque de maturité de la technologie mais surtout l'absence de retour d'expériences sur des parcs d'hydroliennes sur une longue durée rend délicat la prévision des coûts.

Le coût d'investissement pour une hydrolienne est élevé avec un prix compris entre 2,5 et 3,5 M€/MW installés en supposant un développement massif de la filière (2 voire 3 fois plus important que pour une éolienne).

Le coût d'exploitation des hydroliennes est également plus conséquent que celui des éoliennes, les difficultés d'accès exigent un personnel qualifié et l'érosion demande également un entretien plus fréquent. L'estimation du coût d'exploitation est d'environ 40% du coût global de l'hydrolienne au cours de son cycle de vie.

Subventions 2019

L'ADEME subventionne au moyen du Prêt à Taux Zéro et du Crédit d'Impôt, les installations produisant de l'électricité à partir de l'énergie hydraulique depuis le 1er septembre 2014.

Potentiel hydrolien local

Le site Pontchaillou se trouve à proximité de la Villaine. Ce cours d'eau s'écoule au plus près à 1.5 km au sud du site.

2.6.4 Les réseaux de chaleur

Présentation de la technologie

Le Grenelle de l'Environnement a redonné sa place aux réseaux de chaleur en rappelant leur rôle indispensable pour le développement des Energies Renouvelables et de Récupération. Conforté avec la RT 2012, le réseau de chaleur est présenté comme la solution la plus adaptée pour développer une technologie mobilisant massivement les énergies renouvelables.

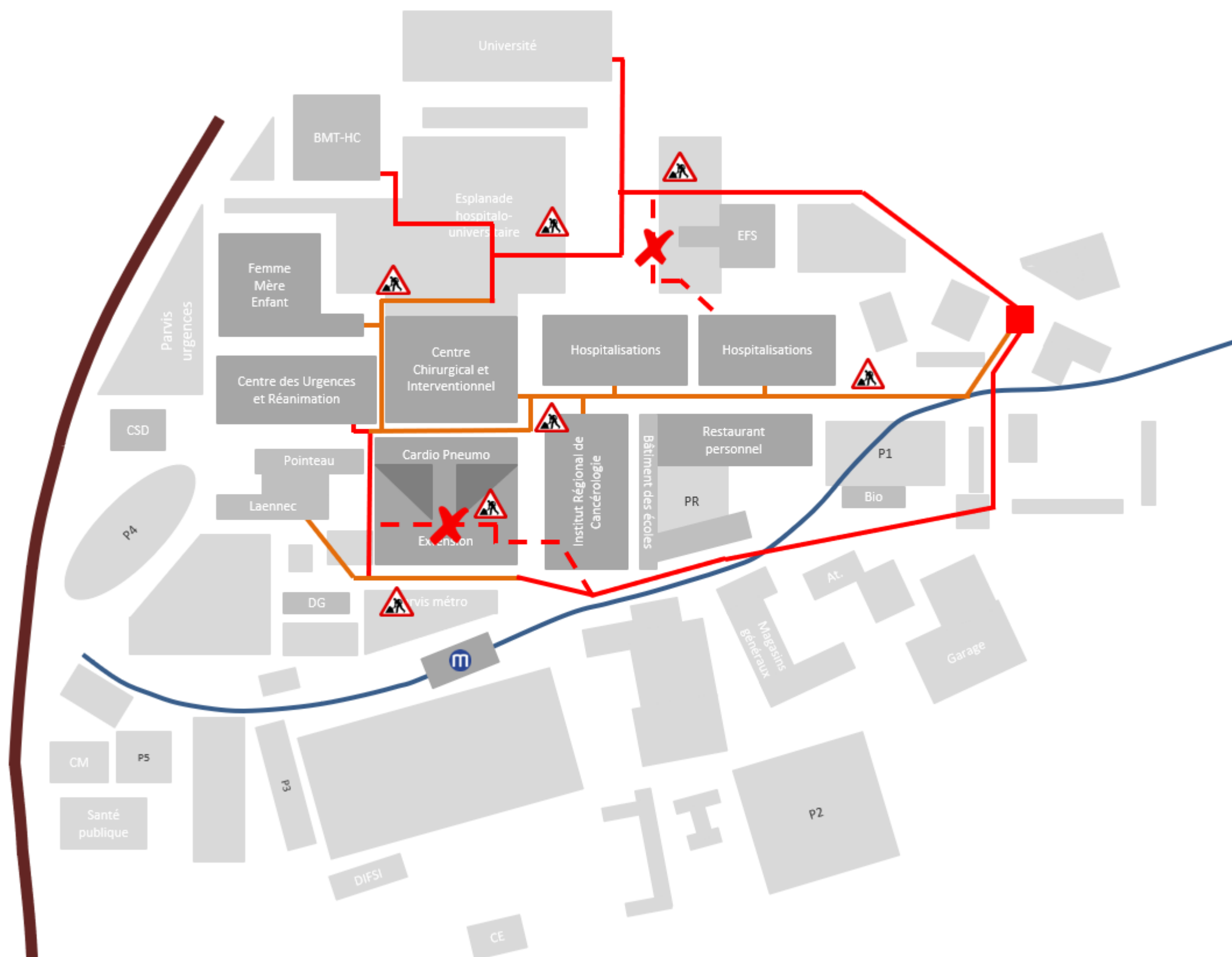
Conformément aux objectifs du Grenelle de l'Environnement, les réseaux de chaleur devront contribuer à hauteur de 25% au développement de la chaleur renouvelable. La loi sur la Transition Energétique et la croissance verte fixe comme objectif de multiplier par 5 la quantité d'énergie renouvelable et de récupération distribuée par les réseaux de chaleur d'ici à 2030. Cela nécessitera d'augmenter le taux d'EnR mais également de raccorder l'équivalent de 7 millions d'équivalents logements supplémentaires.

Le Réseau de chaleur Rennes-Nord

Le site du CHU de Pontchaillou est desservi par le réseau de chaleur Rennes-Nord, alimenté par une centrale thermique et son incinérateur à déchets ménagers. Créé il y a une quarantaine d'années, ce réseau va être rénové et modernisé, indépendamment du projet de reconstruction du site Pontchaillou.

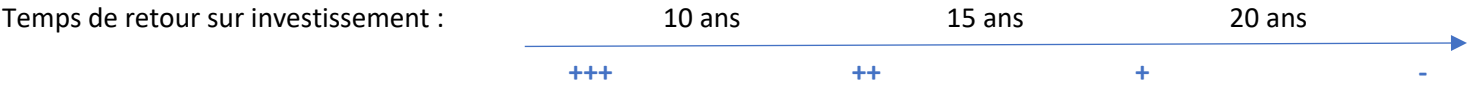
Fonctionnant actuellement en haute température (90°C aller/70°C retour) en moyenne, le réseau va passer en basse température (75°C aller/35°C retour) et permettra de diminuer de jusqu'à 40% les pertes thermiques sur le réseau de distribution.

Les tuyaux présents sur le site seront potentiellement déposés ; un nouveau tracé est à l'étude pour répondre au nouvel agencement du site, une proposition ayant été envoyée par le CHU à Rennes Métropole.



Proposition d'ajustement du tracé du réseau de chaleur sur le site – Source : CHU Rennes

2.7 Synthèse



Le tableau ci-après présente une synthèse des énergies renouvelables et de récupération mobilisable sur le site et une appréciation de leur performance ainsi que de leur possibilité de mise en œuvre pour le projet.

Energie	Utilisation	Coût d'investissement	Coût de l'énergie - variations possibles	Retour sur investissement	Durée de vie	Performance écologique	Autres	Disponibilité sur site	Orientation pour le projet
Solaire	Solaire passif	quasi nul	nul - stable	+++	50 ans	+++	- fiable et robuste	+++	Intégré au projet
	Solaire thermique	modéré 800 à 1500 €/m²	très faible - stable	++	20 ans	++	- fiable et robuste - nécessite peu de maintenance - point de vigilance : périmètre de protection des monuments historiques - nécessite un système d'appoint	+++	Non étudié : les besoins en électricité sur le site étant plus importants que ceux en ECS, les toitures seront réservées aux panneaux solaires photovoltaïques si l'aménagement des toitures est décidé
	Climatisation solaire	modéré	faible - stable	+	?	++	- peu de retours d'expérience fluide caloporteur nécessaire - point de vigilance : périmètre de protection des monuments historiques	+++	Non étudié : peu de retour sur expérience pour permettre l'étude
	Solaire photovoltaïque	modéré environ 2,5 €/Wc	faible - stable	+		++	- fiable et nécessite peu de maintenance - énergie grise des produits importante - point de vigilance : périmètre de protection des monuments historiques	+++	Intégré dans les scénarii
Eolien	Grand et petit éolien	1,6 à 2 M€ / MW	très faible - stable	+++	20 ans	+++	- très dépendant de l'environnement du site - faible énergie grise - impact paysager - point de vigilance : périmètre de protection des monuments historiques	-	Non étudié : site peu favorable au développement d'énergie éolienne
	Eolien urbain		très faible - stable	-	20 à 25 ans	++	- peu de retours d'expérience - point de vigilance : périmètre de protection des monuments historiques	+	Non étudié : uniquement si valeur pédagogique/communication recherchée
Géothermie	Haute énergie	très important	faible - peu fluctuant	++	Pompe à chaleur : 15 à 20 ans	++	- production constante toute l'année - consommations électriques des auxiliaires non négligeable - fluide caloporteur nécessaire	-	Non étudié : non disponible sur site
	Basse énergie	important		++	Sondes / pieux > 30 ans	+++	- production constante toute l'année - fluide caloporteur nécessaire - autorisations administratives spécifiques nécessaires	+++	Non étudié : étude spécifique à réaliser pour connaître les possibilités d'exploitation de la nappe en lien avec la programmation du projet

Energie	Utilisation	Coût d'investissement	Coût de l'énergie - variations possibles	Retour sur investissement	Durée de vie	Performance écologique	Autres	Disponibilité sur site	Orientation pour le projet
	Très basse énergie - PAC sur pieux	faible		+++		++	<ul style="list-style-type: none"> - production constante toute l'année - consommations électriques des auxiliaires non négligeable - fluide caloporteur nécessaire 	++	Non étudié dans le cadre de cette étude, mais une étude spécifique pourra être réalisée ultérieurement selon l'affinage du projet pour connaître les possibilités d'exploitation
	Très basse énergie - PAC sur sondes	faible à modéré selon technologie		+++		++	<ul style="list-style-type: none"> - production constante toute l'année - consommations électriques des auxiliaires non négligeable - fluide caloporteur nécessaire 	+++	Non étudié dans le cadre de cette étude, mais une étude spécifique pourra être réalisée ultérieurement selon l'affinage du projet pour connaître les possibilités d'exploitation
Biomasse	Bois-énergie	important 1 M€/MW	très faible - stable	+++	50 ans	++	<ul style="list-style-type: none"> - mise en place d'un système de traitement des fumées performant nécessaire - taille des locaux de stockage combustible importante - développement filières locales, valorisation de sous-produits - transports routiers induits 	+++	Non étudié : la présence d'une chaufferie biomasse n'est pas envisageable sur le site
	Méthanisation / biogaz	important	faible - stable	++	> 25 ans	+++	<ul style="list-style-type: none"> - injection dans le réseau gaz de ville possible - alternative au gaz naturel - valorisation des déchets organiques ou effluents - développement filières locales - transports routiers induits - autorisations administratives spécifiques nécessaires - emprises importantes nécessaires sur site 	++	Non étudié : difficilement réalisable du fait du contexte urbain du site
Chaleur fatale	Récupération sur eaux grises	modéré	très faible - stable	+++	?	++	<ul style="list-style-type: none"> - retour d'expérience limités - intégration de la technologie en amont du projet pour limiter coûts d'investissement 	+	Non étudié : la difficulté de mise en place de ce système et le manque de potentiel sur le site rendent cette technologie difficilement exploitable

Energie	Utilisation	Coût d'investissement	Coût de l'énergie - variations possibles	Retour sur investissement	Durée de vie	Performance écologique	Autres	Disponibilité sur site	Orientation pour le projet
	Récupération sur eaux usées	modéré	très faible - stable	+++	?	++	- retour d'expérience limités - intégration de la technologie en amont du projet pour limiter coûts d'investissement	+	Non étudié : la difficulté de mise en place de ce système et le manque de potentiel sur le site rendent cette technologie difficilement exploitable
	Récupération sur process industriel	dépendant du contexte	très faible - peu fluctuant	?	?	+	- présence d'installations industrielles importantes à proximité nécessaire	-	Non étudié : aucune source de chaleur exploitable à proximité
Aérothermie	Pompe à chaleur air/air	faible	modéré - fluctuant	+	15 ans	+	- consommations électriques importantes faibles rendements	+++	Non étudié : peu adapté du fait des besoins en froid important
	Puits canadien	très faible	très faible - peu fluctuant	++	50 ans	++	- installation mutualisée avec les travaux de terrassements / fondations	+++	Non étudié : peu adapté du fait des volumes chauffés importants
Hydrolienne	installation dans cours d'eau	important 3,5 M€/MW	modéré	++	?	+	- peu de retours d'expériences - impact sur milieu aquatique à étudier - besoins d'entretien importants	-	Non étudié : aucun cours d'eau permettant ce type d'installation sur site ou à ses abords
Valorisation des déchets	Réseau de chaleur	important	modéré	?	50 aans	+++	- déjà présent sur le site	+++	Intégré au projet

3. PRE-DIMENSIONNEMENT ET SCENARII

Dans cette partie, nous étudierons les différents scenarii de distribution/production envisageables sur site pour déterminer quelle ressource énergétique et quelle configuration de la desserte sont optimales d'un point de vue technique, financier et environnement.

Les estimatifs de besoins énergétiques, coûts à l'investissement et à l'exploitation sont donnés à titre indicatif et seront sujet à des variations en fonction de l'évolution du projet et de l'affinage des données techniques.

3.1 Définition des scenarii d'approvisionnement

Nous étudions les possibilités d'approvisionnement à partir des sources d'énergie disponibles sur site et des objectifs énergétiques fixés (RT 2012 - 20%). En effet, des solutions de production électriques ou au fioul ne seraient pas envisageables car non conformes aux objectifs de consommations énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre.

Trois scenarii sont étudiés pour répondre aux objectifs fixés :

- **Scénario 1 : Chaudières gaz à condensation collectives fournissent 100% des besoins en chauffage et en chaude sanitaire**
- **Scénario 2 : Le réseau de chaleur renouvelé fournit 100% des besoins en chauffage et eau chaude sanitaire**
- **Scénario 3 : Le réseau de chaleur fournit 100% des besoins en chauffage et eau chaude sanitaire. Des panneaux photovoltaïques sont installés en complément pour répondre à une partie des besoins en électricité**

Les besoins en puissance (kW) des différentes typologies sont estimés au regard de la programmation dont nous disposons actuellement. Ils dépendent également des besoins énergétiques estimés au début de notre étude.

	Surface totale (m²)	Puissance requise globale (kW)	Puissance totale requise (kW)
Bâtiments neufs	137 965	22 074	25 749
Bâtiments rénovés	22 964	3 674	

Ces estimations de puissance ont été réalisées par le CHU.

L'analyse des diverses solutions est basée sur deux critères : budgétaire et environnemental.

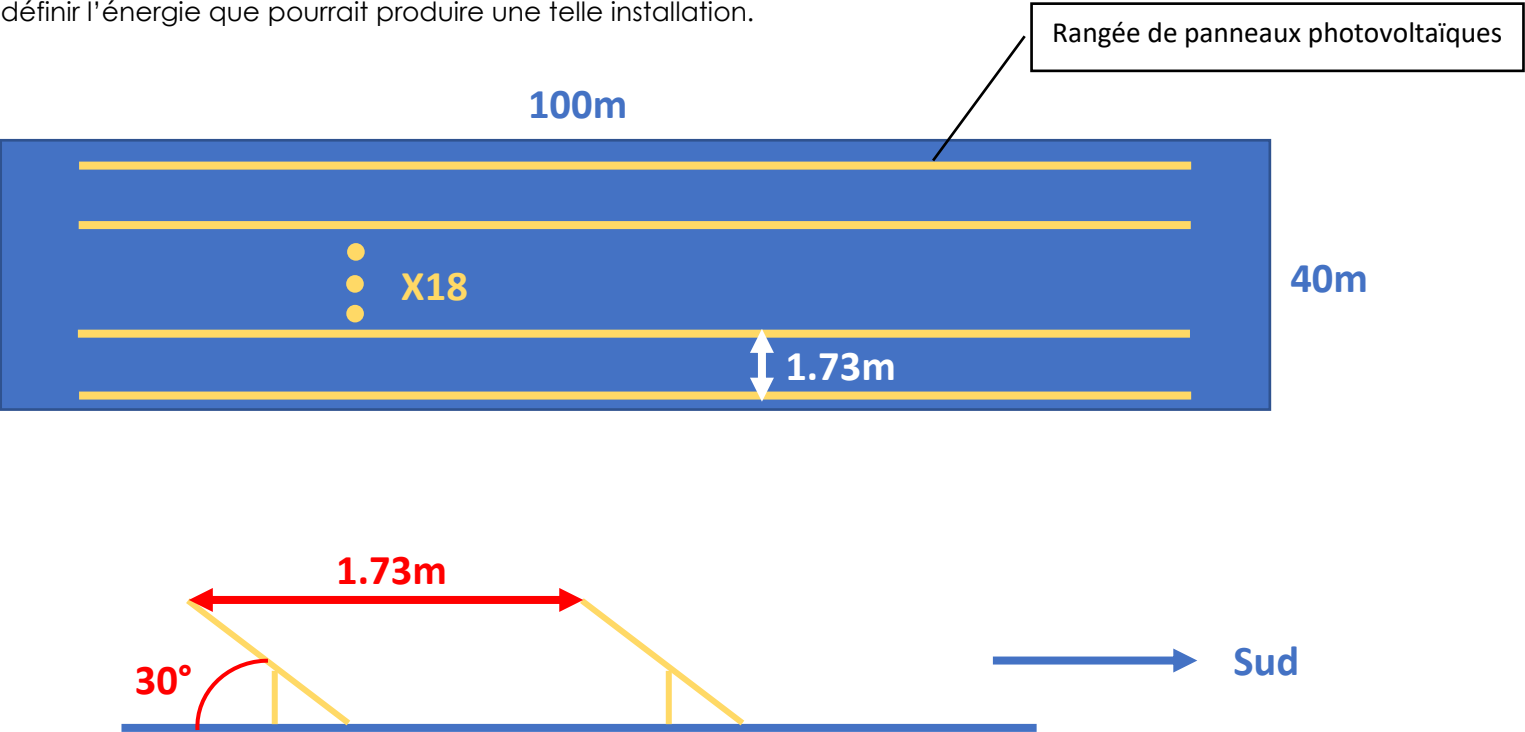
Les besoins énergétiques sont des besoins utiles, c'est-à-dire livrés à l'utilisateur, on ne prend donc pas en compte les pertes sur le réseau ou les pertes de combustion, qui ne sont pas les mêmes pour le gaz et peuvent ainsi entraîner une variation du cout d'exploitation réel.

L'étude permet de comparer, globalement l'impact économique et environnemental lié au choix de la source d'énergie principale utilisée pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le refroidissement.

Il est rappelé que les chiffres affichés dans le présent rapport ne sont qu'indicatifs et seront à confirmer et affiner dans les étapes suivantes de la conception, en partenariat avec les gestionnaires.

3.1.1 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque

Le CHU envisage la possibilité d'installer des panneaux photovoltaïques sur les toitures des deux bâtiments d'hospitalisations. Une surface d'environ 4 000 m² de toiture pour chaque bâtiment a été estimée pour définir l'énergie que pourrait produire une telle installation.



Au total, 22 rangées de 98 panneaux photovoltaïques (de taille standard) pourraient être installées sur chaque toiture, vers le sud, avec une inclinaison de 30° par rapport à l'horizontale. Pour limiter l'effet de masque entre chaque panneau, une distance d'environ 1,73m devra être respectée.

Cette installation formerait alors un parc photovoltaïque d'environ 742 kWc au total.

En fonction de l'ensoleillement rennais moyen et de l'orientation des panneaux, ce parc photovoltaïque pourrait produire 725 MWh/an d'électricité, soit 3% de la consommation annuelle du site (estimation TecSol).

Le prix de rachat de l'électricité produite est estimé à 18.55 cts € /kWh si toute la production est revendue, ce qui est l'option envisagée.

3.1.2 Hypothèses pour l'analyse

Les estimatifs de besoins énergétiques, coûts à l'investissement et à l'exploitation sont donnés à titre indicatif et seront sujet à des variations en fonction de l'évolution du projet et de l'affinage des données techniques, qui demeurent aujourd'hui sommaires et provisoires.

Hypothèses prises pour l'analyse :

- L'analyse en coût global est réalisée sur une durée de 50 ans ;
- Les coûts d'investissement sont donnés sans préoccupation de leur répartition entre les différents acteurs du projet d'aménagement (CHU, Métropole, etc.), qui seront à déterminer par la suite ;

Note : pour les bâtiments qui sont alimentés par des sources énergétiques peu émettrices de CO₂ (via des réseaux de chaleur, dans la pratique), des modulations des niveaux de consommations réglementaires sont admises. Ces niveaux sont les suivants :

- émissions < 150 gCO₂/kWh -> Cepmax +10% ;
- émissions < 100 gCO₂/kWh -> Cepmax + 20 % ;
- émissions < 50 gCO₂/kWh -> Cepmax + 30%.

Le coefficient Bbio reste quant-à lui inchangé et garantit la bonne conception bioclimatique du bâtiment.

Pour simplifier la comparaison des scenarii, nous n'avons pas intégré ces modulations au calcul. Nous considérons donc que la conception de l'enveloppe des bâtiments composant le projet ne varie pas en fonction des scenarii. Seuls les systèmes de production d'énergie varient d'un scenario à l'autre.

Données environnementales

Les facteurs d'émission de gaz à effet de serre (GES) retenus pour les calculs sont ceux définis dans l'annexe 4 de l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic DPE et dans une étude RTE/ADEME.

La teneur en CO₂ du réseau de chaleur Villejean futur n'est pas encore connu, du fait des futurs travaux réalisés et de la future connexion avec le réseau de chaleur Est, qui est alimenté en grande partie par la biomasse. Une première fourchette a été donnée, estimant la teneur de CO₂ du futur réseau entre 50g et 100g_{eqCO2}.

L'hypothèse a été prise dans notre étude de minimiser la teneur future en CO₂, étant donné que le futur concessionnaire du réseau, en date du 01/01/2020, aura pour objectif de réduire au maximum ce chiffre.

D'après l'étude sur les modes de chauffage et le prix de vente de la chaleur (données AMORCE/ADEME) et les données transmises par Rennes Métropole, les facteurs d'émission pour l'ensemble du poste de chauffage (y compris les consommations liées au fonctionnement des auxiliaires) sont les suivants :

	Facteurs d'émission du poste chauffage par mode de chauffage (en gCO2/kWhEu) l'étude sur les modes de chauffage et le prix de vente de la chaleur (données AMORCE/ADEME ; Rennes Métropole)
Réseau de chaleur Villejean	50
	276
Chaudière gaz collective à condensation	
Photovoltaïque	0

Données économiques

L'analyse économique réalisée ici ne doit être considérée que comme indicative : en effet, étant donné l'avancement du projet, celle-ci est réalisée à partir de ratios et en prenant un certain nombre d'hypothèses.

L'analyse économique est réalisée d'un point de vue global. Les scénarios sont comparés selon le coût global moyen à l'échelle du secteur, exprimée en € TTC / MWh. Ce coût global prend en compte l'ensemble des coûts d'investissements et d'exploitation pour chacun des scénarios :

- P1 : consommations énergétiques

- P1' : consommations des auxiliaires nécessaires à la production énergétique ;
- P2 : conduite et petit entretien ;
- P3 : gros entretien et renouvellement à l'identique des installations ;
- P4 : amortissement des installations

A noter que les coûts sont indiqués dans leur globalité, sans indications de répartition des couts de portage. Tous ces frais ne relèvent pas uniquement de la maîtrise d'ouvrage.

Les coûts unitaires présentés ci-dessous sont des estimatifs et s'appliquent à l'ensemble des lots pour lesquels nous ne disposons pas de données précises.

Coûts d'investissement (en € HT) (Source : diverses)		
Chaudière collective gaz à condensation	300	€ /kW
Réseau de chaleur Villejean	Maximum de 1 000 000 € (fourchette indicative)	
Photovoltaïque	3000	€ /kW

Coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation sont estimés en prenant en compte le coût de l'énergie (consommations et abonnement), les coûts de maintenance type P2+P3 et le renouvellement de l'installation (P4). Les hypothèses de prix de l'énergie se basent sur les tarifs en offre de marché.

Pour le gaz, les coûts sont tirés des prix moyens de vente de la chaleur pondérés en 2013 énoncés dans l'analyse AMORCE de 2015.

Le prix de la chaleur considéré est identique à celui actuellement en vigueur sur le réseau de chaleur, soit 65€/MWh.

Le prix de revente de l'électricité produite sur le site est de 18.55 cts€/kWh, prix fixé par arrêté tarifaire du 9 mai 2017.

Rendements des installations

Les rendements pris en compte sont :

- 85 % pour le réseau de chaleur, prenant en compte le rendement de l'échangeur de chaleur en sous-station, et celui du circuit interne de distribution et émetteur de chaleur ;
- 15 % pour les panneaux photovoltaïques.

3.2 Analyse économique

Sans évolution des coûts de l'énergie

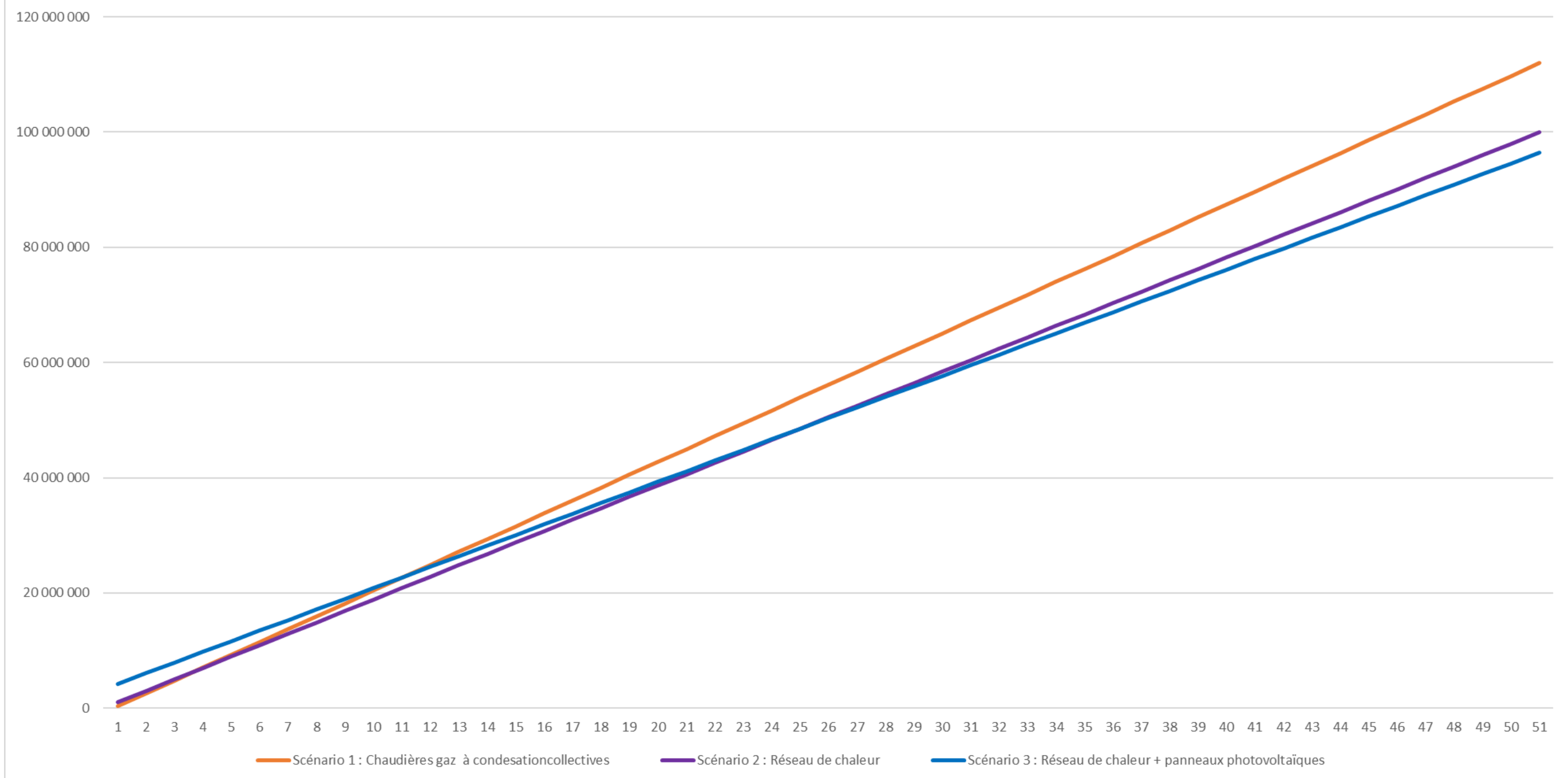
Pour l'ensemble des lots, l'analyse économique réalisée ici ne doit être considérée que comme indicative. Etant donné l'avancement du projet, celle-ci est réalisée à partir de ratios et en prenant un certain nombre d'hypothèses.

	Scénario 1 : Chaudières gaz à condensation collectives	Scénario 2 : Réseau de chaleur rénové	Scénario 3 : Réseau de chaleur rénové + panneaux
Coût d'investissement TOTAL (en € TTC)	316 500	1 055 000	4 365 712
Subventions Mobilisables (en € TTC)	0	0	0
Cout d'investissement avec subventions (en € TTC)	316 500	1 055 000	4 365 712
Cout total en Millions d'€ TTC (sur 50 ans) sans évolution du cout de l'énergie	112	100	96
Cout global en €/MWh TTC sans évolution du cout de l'énergie	87	77	75

Sans tenir compte de l'évolution des coûts de l'énergie, le recours au réseau de chaleur devient intéressant après environ 6 ans d'exploitation. L'installation de panneaux photovoltaïques en complément de ce réseau de chaleur est plus longue à rentabiliser (environ 12 ans), mais est la solution la plus rentable financièrement du fait de la revente de l'électricité, équivalente à environ 135 000€/an.

En négligeant les tendances évolutives actuelles, l'installation de chaudières collectives gaz à condensation est nettement défavorable d'un point de vue économique sur le long terme, malgré un investissement moindre au départ.

Evolution des coûts sur 50 ans (sans hausse annuelle du coût de l'énergie)



Avec évolution des coûts de l'énergie

L'étude Amorce-ADEME : comparatif des modes de chauffage et prix de vente de la chaleur (2015) prend en compte les évolutions annuelles des prix des énergies suivantes :

- 2% sur le prix du gaz ;
- 2% sur le prix de la chaleur ;
- 0% sur le prix de rachat d'électricité photovoltaïque (prix étant fixé par arrêté tarifaire).

Pour notre étude, nous prenons les hypothèses suivantes :

	Gaz naturel	Chaleur (issue du RCU)	Rachat d'électricité
Tendance	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Evolution annuelle des prix de l'énergie (P1+P2+P3)	+ 3 %	+ 2 %	0 %

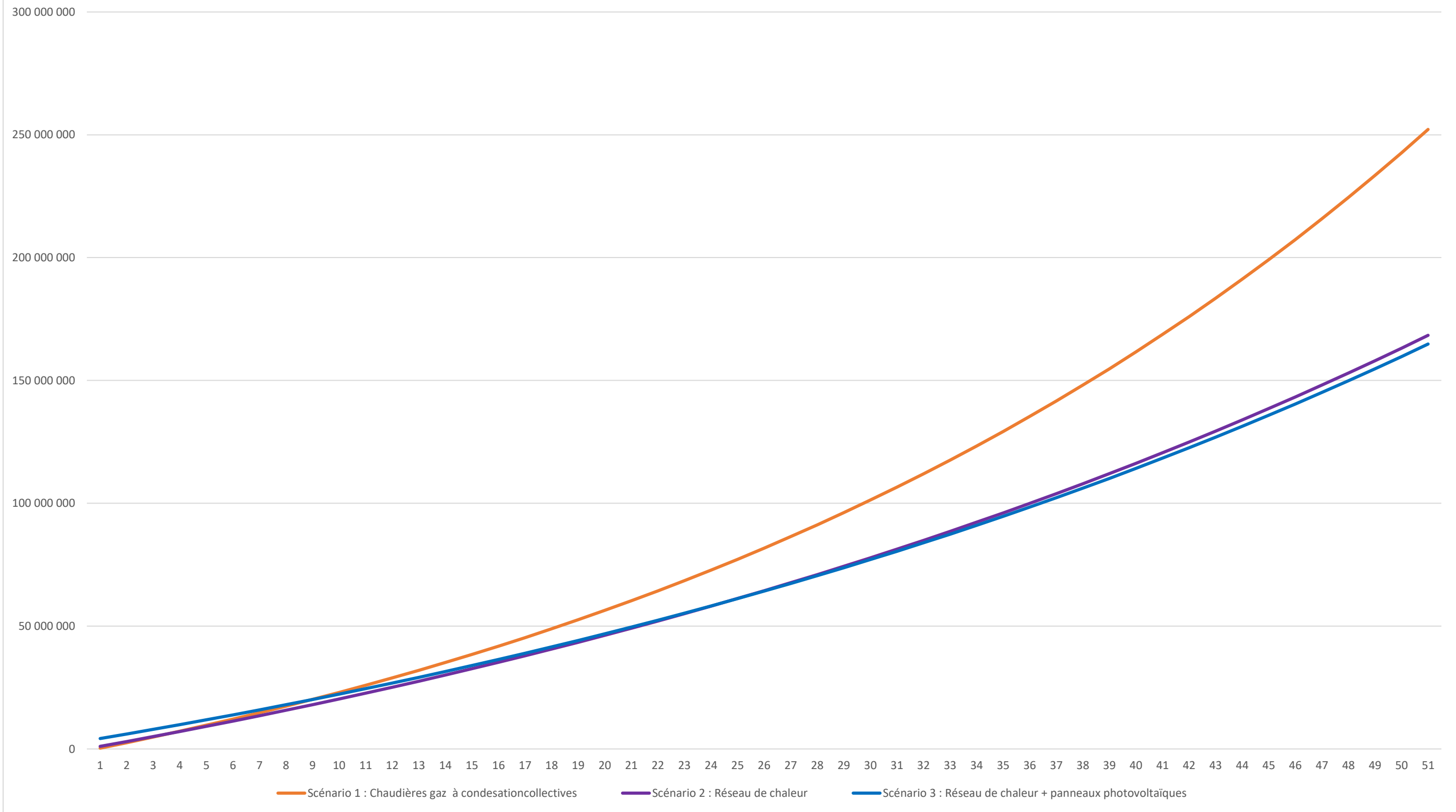
	Scénario 1 : Chaudières gaz à condensation collectives	Scénario 2 : Réseau de chaleur	Scénario 3 : Réseau de chaleur + panneaux photovoltaïques
Investissement (€ TTC installé)	316 500	1 055 000	4 365 712
Subventions mobilisables (€ TTC)	0	0	0
Cout d'investissement avec subventions (en € TTC)	316 500	1 055 000	4 365 712
Cout total en € TTC (sur 50 ans) avec évolution du coût de l'énergie	252 184 095	168 373 533	164 825 382
Cout global en €/MWh TTC avec évolution du cout de l'énergie	195	130	127

En tenant compte des tendances constatées et de l'évolution des coûts des énergies, cette analyse des coûts montre que les deux solutions mobilisant des énergies renouvelables sont plus avantageuses économiquement encore plus rapidement, après 4 et 10 d'années d'exploitation. En effet, la hausse du prix du gaz annuelle est plus élevée que la hausse du prix de la chaleur.

Les deux scénarii comprenant l'utilisation du réseau de chaleur sont bien avantageux d'un point de vue économique, avec un cout global inférieur d'environ 80M€ par rapport au scénario « de base » avec les chaudières collectives.

La différence entre les deux scénarii financièrement parlant est très maigre (environ 2%).

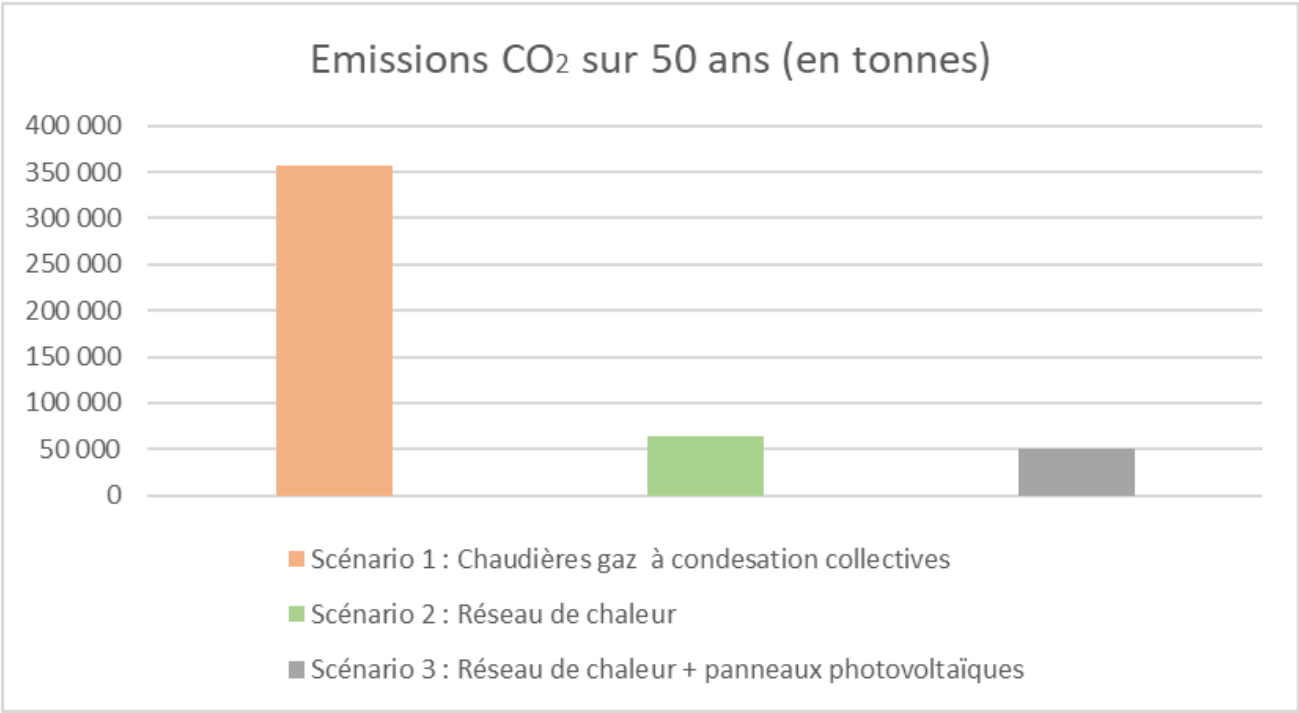
Evolution des coûts sur 50 ans
(avec hausse annuelle du coût de l'énergie)



3.3 Analyse environnementale

Nous avons établi des estimatifs selon les données de références précisées plus haut dans notre étude. Ainsi, les émissions estimées de CO2 générées, suivant les scenarii, sont les suivantes :

	Scénario 1 : Chaudières gaz à condensation collectives	Scénario 2 : Réseau de chaleur	Scénario 3 : Réseau de chaleur + panneaux photovoltaïques
Besoins en Chaud en kWh	25 869 320		
Emissions annuelles CO ₂ (en T/an)	7 140	1 293	1 023
Emissions CO ₂ sur 50 ans (en T)	356 997	64 673	51 173



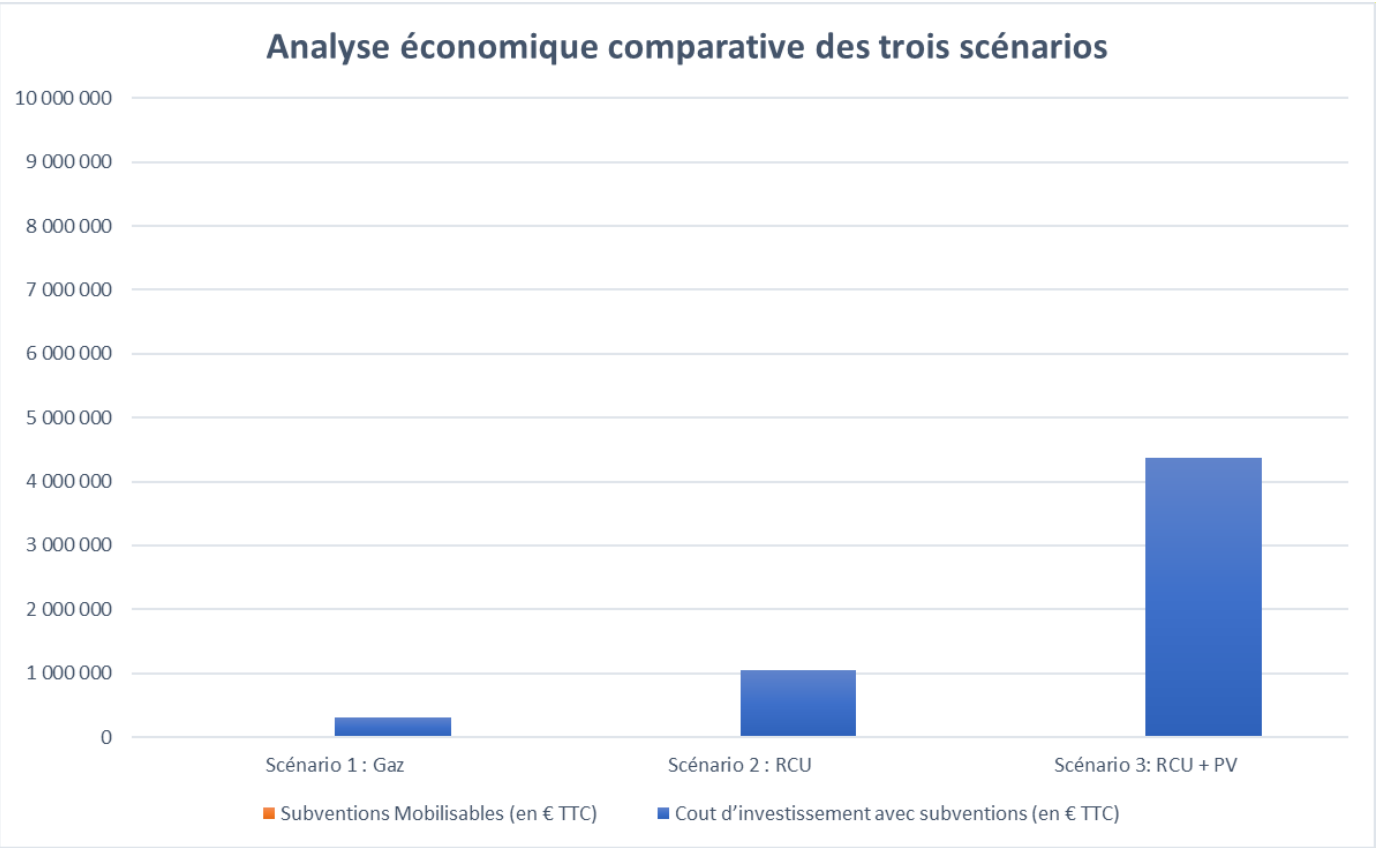
Sur le plan environnemental, les solutions les plus intéressantes sur les trois scénarii étudiés sont celles utilisant le réseau de chaleur. Cette solution énergétique permet de diviser par 6 les émissions de CO2 comparés à la solution chaudières à gaz collectives.

La production photovoltaïque permet d'éviter l'émission de 270 tonnes de CO2 par an, soit 20% des émissions annuelles du réseau de chaleur.

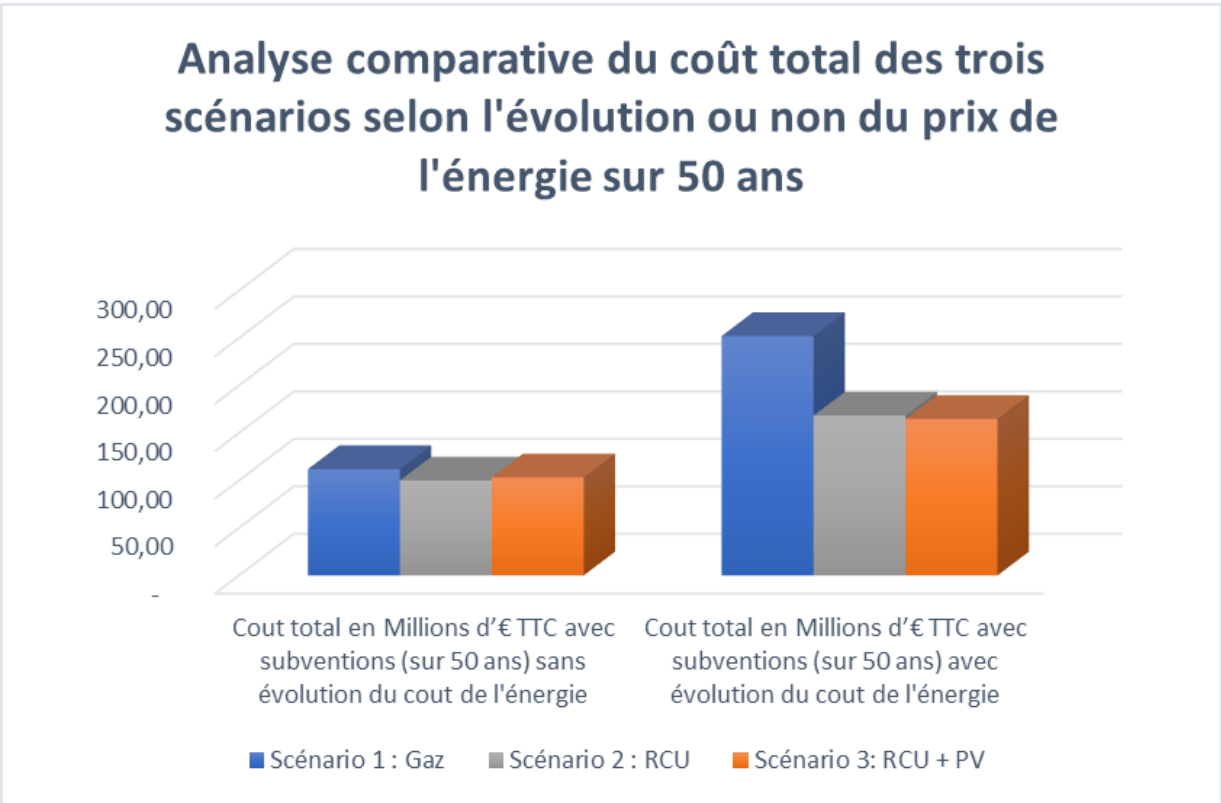
4. CONCLUSION

Les graphiques suivants permettent de comparer les différents scénarii analysés dans l'étude au regard des critères suivants :

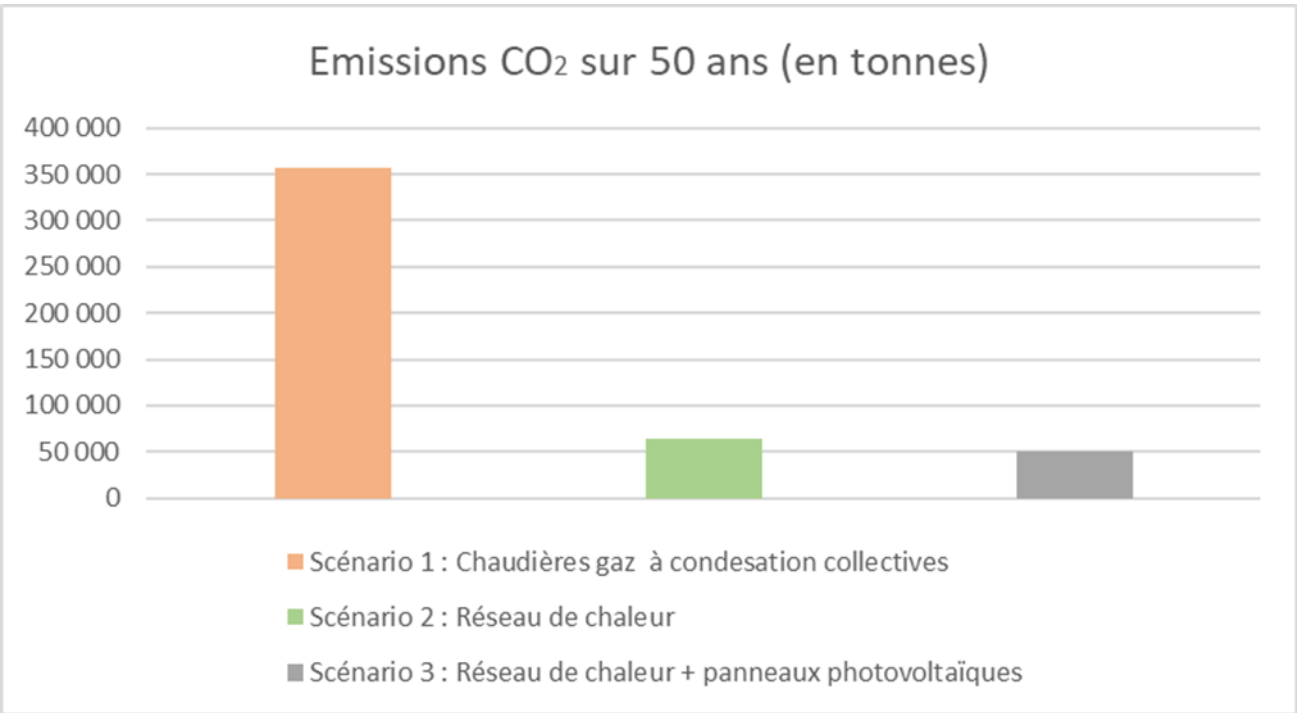
Analyse économique comparative à l'investissement initial des différents scénarios :



Analyse économique comparative sur le coût total des différents scénarios :



Analyse environnementale comparative des différents scénarios :



Si la réflexion se porte sur un investissement à long terme, et en tenant compte des évolutions du coût de l'énergie, les scénarii 2 et 3 sont les plus intéressants, tant d'un point de vue économique qu'environnemental.

Le taux d'énergies renouvelables utilisé pour la production de chaleur permet de largement limiter la teneur en CO₂ du réseau de chaleur Villejean présent sur le site Pontchaillou. Toutefois, ces solutions nécessitent un coût d'investissement plus important que la solution tout gaz, mais sont rentabilisés en moins de dix ans.

La solution mobilisant une installation de chaufferies décentralisées gaz à condensation reste la plus avantageuse à l'investissement. En revanche, il est à prendre en compte le bilan environnemental largement négatif ainsi que l'évolution du coût de cette énergie non renouvelable qui a tendance à augmenter fortement, faisant bondir le coût global.

La solution intégrant l'installation de panneaux photovoltaïques en toiture de deux bâtiments est légèrement plus avantageuse d'un point de vue financière du fait de la revente de l'intégralité l'électricité produite sur le site. Néanmoins, l'incertitude sur le prix de rachat dans le futur pourrait rendre cette solution beaucoup moins rentable financièrement.

Les deux solutions intégrant le réseau de chaleur sont valables et feront office d'approvisionnement énergétique de qualité, au bon bilan environnemental et économiquement raisonnable.

Ces deux scénarios pourront donc faire l'objet d'études de faisabilité plus poussées dans la suite des étapes de la conception, auxquels pourraient également s'adjoindre l'analyse d'un scénario supplémentaire mobilisant une solution géothermie complémentaire au réseau de chaleur.

Aussi, le phasage du projet de reconstruction du site Pontchaillou, complexe, sera un élément fondamental pour planifier le déploiement progressif du nouveau réseau de chaleur. Celui-ci devra être anticipé au fil des opérations prévues.

Tableau récapitulatif des atouts et des inconvénients par solutions d'installation après analyse :

	Avantages	Inconvénients
Scénario 1 : Chaudières gaz collectives à condensation	<ul style="list-style-type: none">• Coût d'investissement raisonnable• Facilité d'installation et d'entretien• Coût de maintenance modéré	<ul style="list-style-type: none">• Emissions de gaz à effet de serre importantes• Incertitude sur la disponibilité de la ressource à long terme• Risque élevé d'augmentation du coût de l'énergie
Scénario 2 : Réseau de chaleur	<ul style="list-style-type: none">• Gain financier• Ressource a priori inépuisable (déchets)• Bilan environnemental	<ul style="list-style-type: none">• Investissement coûteux
Scénario 3 : Réseau de chaleur + panneaux photovoltaïques	<ul style="list-style-type: none">• Gain financier• Ressource a priori inépuisable (déchets)• Bilan environnemental• Réponse au fort besoin en électricité du site, dans une certaine mesure	<ul style="list-style-type: none">• Investissement coûteux• Emprises nécessaires en toiture pour les installations• Incertitude sur le prix de rachat futur