



FONCIM

OPERATION D'AMENAGEMENT DE LOGEMENTS

Etude du potentiel de développement en énergies renouvelables – THUE ET MUE (14)



Rapport /C– Mars 2023

Projet suivi par Marie JOLY – 06.17.84.52.79 – marie.joly@anteagroup.fr

Fiche signalétique

OPERATION D'AMENAGEMENT DE LOGEMENTS

Etude du potentiel de développement en énergies renouvelables – THUE ET MUE (14)

MAITRE D'OUVRAGE

Mr GUILLOTIN	Foncim
34 grande rue 14123 FLEURY SUR ORNE	Le Haut du Pavé, Thue-et-Mue
Contact opérationnel : Gaëlle HERGAULT	
 <p>VOTRE AVENIR EST NOTRE PRÉSENT GEOMETRES-EXPERTS www.amenageo.fr Tél : 02.31.65.02.20 – Fax : 02.31.65.02.40 9, Place du Bras d'Or 14130 PONT L'ÈVEQUE</p>	

RAPPORT D'ANTEA GROUP

Responsable du projet	Marie JOLY
Interlocuteur commercial	Marie JOLY
	Implantation d'Antony
Implantation chargée du suivi du projet	01.57.63.14.00 secretariat.paris-fr@anteagroup.fr
Rapport n°	115915
Version n°	C
Votre commande et date	Signature offre technique le 04.01.22
Projet n°	NIEP210563

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	Aimie ROUSSILLON	Ingénieur d'étude	Février 2022	
Approbation	Marie JOLY	Responsable d'activité Eau Ressource Géothermie	Février 2022	

Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A	01/03/2022	69	0	1 ^{ère} version
B	27/09/2022	69	0	2 ^{ème} version
C	08/03/2023	68	0	3 ^{ème} version

Sommaire

1. Présentation et objectifs de l'étude	8
2. Contexte global.....	9
2.1. Contexte mondial, européen et national	9
2.1.1. Les énergies renouvelables	9
2.1.2. Situation à différentes échelles.....	9
2.1.3. Les engagements européens et français.....	13
2.2. Contexte local.....	16
2.2.1. Consommations énergétiques de Normandie	16
2.2.2. Consommations énergétiques de Caen la mer	18
3. Présentation du projet	21
3.1. Contenu du projet	21
3.2. Localisation du projet.....	21
3.3. Besoins énergétiques du projet	23
4. Les infrastructures d'approvisionnement en énergies existantes	24
4.1.1. Approvisionnement en gaz	24
4.1.2. Approvisionnement en électricité.....	24
4.1.3. Approvisionnement en chaleur.....	24
5. Gisements énergétiques de la zone d'étude	25
5.1. L'énergie éolienne	25
5.1.1. Principes.....	25
5.1.2. Aspects réglementaires.....	27
5.1.3. Potentiel régional.....	27
5.1.4. Potentiel local	29
5.1.5. Impact sur l'environnement.....	31
5.1.6. Exemples d'applications.....	32
5.2. L'énergie Solaire	33
5.2.1. Principe	33
5.2.2. Aspects réglementaires.....	35
5.2.3. Potentiel régional.....	37
5.2.4. Potentiel local	39
5.2.5. Aides au développement	40
5.2.6. Impact sur l'environnement.....	42
5.2.7. Exemples d'application	42

5.3. Bois – énergie	45
5.3.1. Principe	45
5.3.2. Aspects réglementaires	47
5.3.3. Potentiel régional	48
5.3.4. Potentiel local	49
5.3.5. Aides au développement	49
5.3.6. Le bois-énergie et l’environnement	50
5.3.7. Exemples d’applications	50
5.4. Biogaz	51
5.4.1. Principes	51
5.4.2. Aspects réglementaires	52
5.4.3. Potentiel régional	53
5.4.4. Potentiel local	53
5.4.5. Aides au développement	54
5.4.6. Impacts sur l’environnement	54
5.4.7. Exemples d’application	55
5.5. Récupération de chaleur sur les eaux usées	56
5.5.1. Principe	56
5.5.2. Potentiel régional	57
5.5.3. Potentiel local	59
5.6. Géothermie	60
5.6.1. Principe	60
5.6.2. Aspects réglementaires	63
5.6.3. Potentiel régional	64
5.6.4. Potentiel local	65
5.6.5. Aides au développement	66
5.6.6. Impact sur l’environnement	66
6. Analyse des opportunités et orientations possibles	67
6.1. Besoins thermiques	67
6.2. Besoins en électricité	67

Table des figures

Figure 1 - Consommation des énergies primaires en 2019 à différentes échelles (Source : BP Statistical Review of World Energy 2020)	10
Figure 2 – Production électrique par source d'énergie en 2019 (Sources : BP Statistical Review of World Energy 2020 et RTE Bilan électrique 2019)	11
Figure 3 - Part des énergies renouvelables dans la production française d'électricité en 2019 (Source : RTE - bilan électrique 2019)	12
Figure 4 - Evolution de la production électrique en TWh entre 2016 et 2020 en France (Source : RTE - Bilan électrique 2020)	13
Figure 5 - Part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale brute des états membres (Source : I4CE, d'après Eurostat 2020).....	14
Figure 6 - Indicateurs évalués dans le cadre de la RE 2020 (Source : Guide RE 2020, CEREMA)	16
Figure 7 - Consommation d'énergie par secteur en 2018 en GWh (Source : Orecan).....	17
Figure 8 - Répartition de la consommation énergétique par produit énergétique en 2018 en Normandie (Source : Orecan).....	17
Figure 9 - Consommation énergétique en GWh par secteur d'activité à Caen la Mer en 2018 (Source : Orecan).....	18
Figure 10 - Origine de l'énergie consommée en GWh sur le territoire de Caen la Mer en 2018 (Source : Orecan).....	18
Figure 11 - Consommation d'énergie dans le secteur résidentiel à Caen la Mer en 2018 (Source : Orecan).....	19
Figure 12 - Consommation d'énergie dans le secteur tertiaire à Caen la Mer (Source : Orecan)	19
Figure 13 - Plan de masse du projet fourni par AMENAGEO	21
Figure 14 - Localisation du site sur fond IGN.....	22
Figure 15 - Localisation du projet sur fond IGN - Zoom	Erreur ! Signet non défini.
Figure 16 - Localisation du projet sur fond cadastral (Source : Géoportail)	22
Figure 17 - Rapport entre la taille et la puissance d'une éolienne (Source : les 7 vents du Cotentin) .	26
Figure 18 - Répartition de la puissance raccordée et de la production éolienne par région en 2019..	28
Figure 19 - Cartes des vents pour la France (Source : étude du potentiel en énergies renouvelables de Caen métropole (Explicit)).....	29
Figure 20 - Extrait de la cartographie des zones favorables à l'éolien (Source : Schéma régional éolien de Basse-Normandie, septembre 2012).....	29
Figure 21 - Rose des vents de la station de Caen-Carpique (Source : Météo France).....	30
Figure 22 - Eoliennes à axe horizontal de la Communauté d'Agglomération de Caen la Mer.....	32
Figure 23 - Petite éolienne à axe vertical de type Darrieus (Source : Anemoos) (à gauche) et éolienne à axe vertical (Source : Quienrevolution) (à droite).....	32
Figure 24 - Ensoleillement en France métropolitaine (kWh/m2.j) (Source : Tecsol)	37
Figure 25 - Carte de la puissance raccordée par région en solaire photovoltaïque en 2019 (gauche) et de la production par région en 2019 (droite) (Source : EDF)	38
Figure 26 - Données d'ensoleillement moyennes mensuelles enregistrées à la station Caen-Carpique (1981-2010) (Source : Météo France)	39
Figure 27 - Parcours du soleil à Caen, données Pléiades (Source : les 7 Vents du Cotentin)	40
Figure 28 - Illustration du principe du pare soleil	42
Figure 29 - Panneaux solaires sur châssis	Figure 30 - Panneaux solaires en surimposition.....
	43
Figure 31 - Intégration de toiture.....	43
Figure 32 - Membrane d'étanchéité.....	43
Figure 33 - Bac métallique.....	43
Figure 34 - Brise soleil	43

Figure 35 : Verrière.....	44
Figure 36 : Garde ciros et allège.....	44
Figure 37 - Parking solaire	44
Figure 38 - Eclairage public solaire	44
Figure 39 - Chauffe-eau solaire collectif	44
Figure 40 – CESI.....	44
Figure 41 - Principaux éléments constitutifs d'une chaudière automatique à bois	46
Figure 42 - Caractéristiques des installations de chaudières automatiques en fonction de leur taille (Source Association AILE)	47
Figure 43 - Ressources et usages du bois en Normandie (milliers de tonnes) (Source : Biomasse Normandie)	48
Figure 44 - Evolution de la puissance installée dans les chaufferies normandes (MW puissance installée) (Source : Biomasse Normande)	49
Figure 45 : Chaufferie bois de Saint Hilaire du Harcouet (50) (Source : les 7 Vents du Cotentin)	50
Figure 46 : Usine de méthanisation de Passel (Source : Fertigaz).....	55
Figure 47 : Usine de méthanisation du SEVADEC (Source : Communauté d'agglomération du Calaisis)	55
Figure 48 : Illustration d'un des principes possibles de récupération de chaleur sur eaux usées à grande échelle	56
Figure 49 - Localisation des six stations d'épuration du territoire de Caen-la-Mer (Source : Communauté urbaine de Caen-la-Mer)	57
Figure 50 - Localisation de la station d'épuration de Bretteville-l'Orgueilleuse.....	59
Figure 51 : les ressources géothermiques en France (source BRGM).....	61
Figure 52 : Principe de fonctionnement général d'une pompe-à-chaleur sur eau de nappe	62
Figure 53 - Pompe à chaleur sur sondes géothermiques horizontales (à gauche) et pompe à chaleur sur sondes géothermiques verticales (à droite) (Sources : ADEME, BRGM).....	63
Figure 54 - Eligibilité à la GMI (Source : Géothermies perspectives)	65

Table des tableaux

Tableau 1 – Ratio des besoins énergétiques identifiés	23
Tableau 2 - Besoins en énergie estimés en fonction des données fournies par AMENAGEO	23
Tableau 3 - Vitesse du vent moyenné sur 10 minutes (en m/s) de 1981-2010 (Source : Météo France)	30
Tableau 4 - Autorisation d'urbanisme exigée pour la pose de panneaux solaires au sol	36
Tableau 5 - Données d'ensoleillements mensuels à Caen (Source : PVGIS)	40
Tableau 6 - Tableau récapitulatif du montant de la prime pour les panneaux solaires en autoconsommation actuellement en vigueur	41
Tableau 7 - Exemples de structures équipées de chaufferie bois collectives à proximité du projet d'aménagement (Source : Biomasse Normandie, 2021)	49
Tableau 8 – Stations d'épurations présentes sur le territoire de Caen-la-Mer (Source : Sispea)	58

1. Présentation et objectifs de l'étude

La société FONCIM est porteuse d'un projet d'aménagement prévoyant à terme la construction de plusieurs ensembles immobiliers composés de 59 lots libres (surface de plancher de 250 m²/lot), 20 maisons groupées (surface de plancher de 75 m²/maison), 26 logements intermédiaires (surface de plancher de 75 m²/logement intermédiaire) et 1 bâtiment de commerce (surface de plancher d'environ 300 m²).

Le projet est soumis à une demande de permis d'aménager ainsi qu'à une procédure d'évaluation environnementale, pour laquelle une étude d'impact sera élaborée. La société AMENAGEO est en charge de la réalisation du dossier réglementaire d'évaluation environnementale du projet d'aménagement localisé sur la commune de Thue-et-Mue (14).

L'article L300-1-1 du code de l'Urbanisme, en vigueur depuis le 25 août 2021, prévoit que :

« Toute action ou opération d'aménagement soumise à évaluation environnementale en application de l'article L. 122-1 du code de l'environnement doit faire l'objet :

1° D'une étude de faisabilité sur le potentiel de développement en énergies renouvelables de la zone, en particulier sur l'opportunité de la création ou du raccordement à un réseau de chaleur ou de froid ayant recours aux énergies renouvelables et de récupération ;

2° D'une étude d'optimisation de la densité des constructions dans la zone concernée, en tenant compte de la qualité urbaine ainsi que de la préservation et de la restauration de la biodiversité et de la nature en ville.

Un décret en Conseil d'Etat détermine les modalités de prise en compte des conclusions de ces études dans l'étude d'impact prévue à l'article L. 122-3 du même code ».

Dans le cadre de cette réglementation, FONCIM et AMENAGEO souhaitent donc analyser le potentiel de développement des énergies renouvelables sur la zone du projet.

La présente étude vise à étudier les gisements des différents types d'énergies renouvelables de la zone du projet et à étudier le caractère exploitable ou non de ces énergies pour le projet. Cette étude n'a pas vocation à être une étude technico-économique sur les solutions énergétiques à apporter au projet. Toutefois, des éléments techniques et de coûts sont présentés pour chacune des énergies étudiées.

2. Contexte global

2.1. Contexte mondial, européen et national

2.1.1. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel.

L'utilisation des énergies renouvelables permet de lutter contre l'effet de serre, en réduisant notamment les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère. En développement dans le monde entier, les énergies renouvelables permettent de gérer de façon intelligente les ressources locales et de créer des emplois. On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles : pétrole, charbon, gaz, uranium.

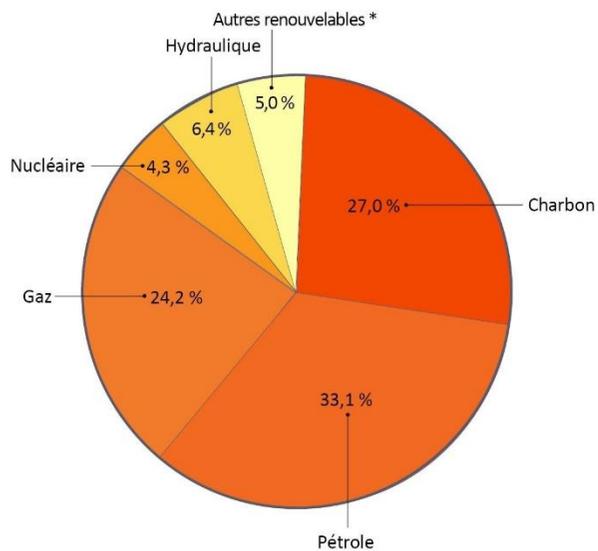
Les énergies renouvelables peuvent être classées en 5 grandes familles :

- **L'énergie solaire :**
 - Le solaire photovoltaïque,
 - Le solaire thermique,
- **L'énergie éolienne,**
- **L'énergie hydraulique,**
- **La biomasse et les bioénergies :**
 - La biomasse, en particulier le bois-énergie,
 - La valorisation énergétique des déchets,
 - Le biogaz,
 - Les biocarburants.
- **La géothermie :**
 - La géothermie très basse énergie (moins de 30°C),
 - La géothermie basse énergie (30 à 90°),
 - La géothermie moyenne énergie (90 à 150°C),
 - La géothermie haute énergie (plus de 150°C),
 - La récupération de chaleur sur les eaux usées.

2.1.2. Situation à différentes échelles

LA CONSOMMATION DES ÉNERGIES PRIMAIRES EN 2019

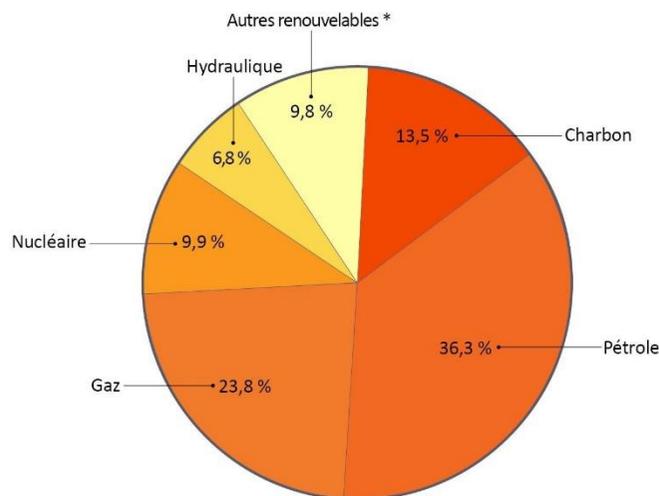
Mix énergétique Monde - 2019
(en % de la consommation totale)



* Eolien, solaire, bioénergies, géothermie, déchets

Source : BP Statistical Review of World Energy 2020

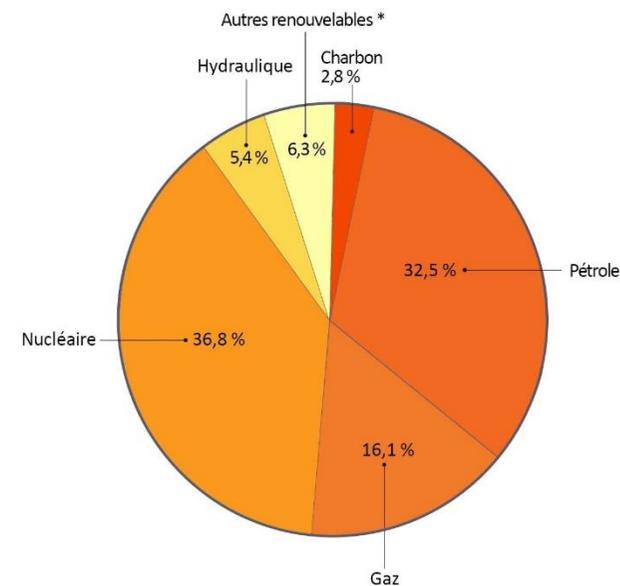
Mix énergétique Europe - 2019
Union européenne, UK, Suisse, Norvège, Ukraine et Turquie
(en % de la consommation totale)



* Eolien, solaire, bioénergies, géothermie, déchets

Source : BP Statistical Review of World Energy 2020

Mix énergétique France - 2019
(en % de la consommation totale)



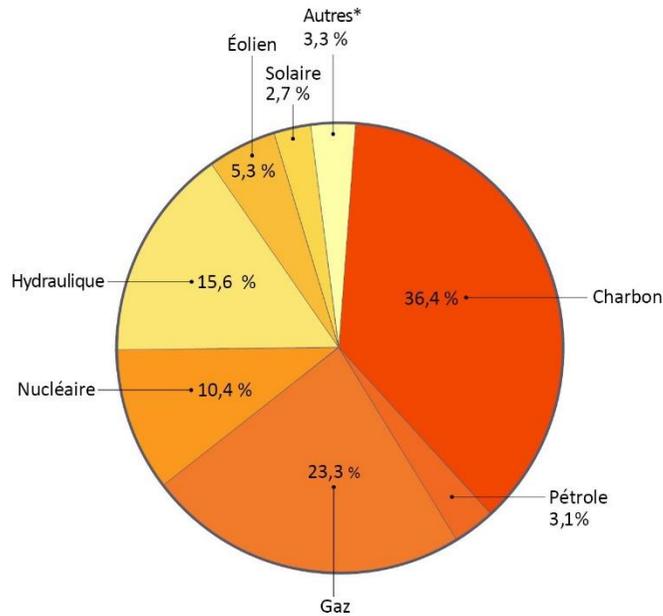
* Eolien, solaire, bioénergies, géothermie, déchets

Source : BP Statistical Review of World Energy 2020

Figure 1 - Consommation des énergies primaires en 2019 à différentes échelles (Source : BP Statistical Review of World Energy 2020)

LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE PAR SOURCE D'ÉNERGIE EN 2019

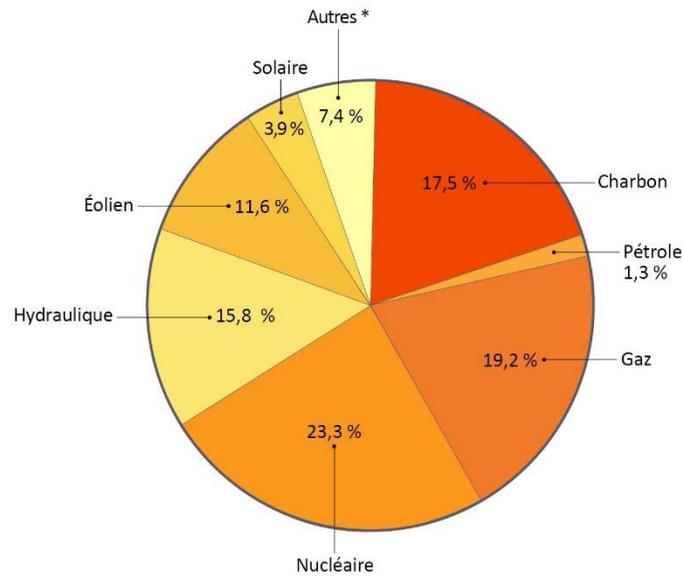
Mix électrique Monde - 2019
(en % de la production totale)



* Géothermie, biomasse, déchets et autres sources d'énergie renouvelable.

Source : BP Statistical Review of World Energy 2020

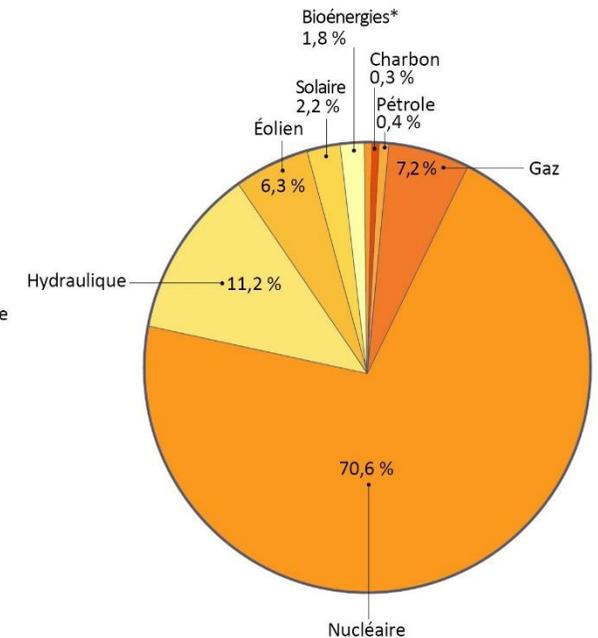
Mix électrique Europe - 2019
Union européenne, UK, Suisse, Norvège, Ukraine et Turquie
(en % de la production totale)



*Géothermie, biomasse, déchets et autres sources d'énergie renouvelable.

Source : BP Statistical Review of World Energy 2020

Mix électrique France - 2019
(en % de la production totale)



* Biogaz, biomasse, déchets

Source : RTE Bilan électrique 2019

Figure 2 – Production électrique par source d'énergie en 2019 (Sources : BP Statistical Review of World Energy 2020 et RTE Bilan électrique 2019)

- **Situation à l'échelle mondiale**

En 2019, à l'échelle mondiale, le pétrole occupe la première place des énergies les plus consommées (environ 33,1% de la consommation mondiale). Le charbon est la deuxième source d'énergie la plus consommée soit environ 27% de la consommation mondiale. Le gaz naturel se place en troisième position avec 24,2% de la consommation mondiale. Les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) représentent ainsi la majorité des sources d'énergie consommées dans le monde (84,3%) en 2019. La part des énergies renouvelables ne représente que 11,4% de la consommation mondiale en 2019. **(Figure 1)**

A l'échelle mondiale, l'électricité est principalement produite à partir de charbon (36,4%), de gaz (23,3%) ou d'hydraulique (15,6%). Les énergies renouvelables ne représentent que 26,9% de la production. **(Figure 2)**

- **Situation à l'échelle de la France**

En France, la principale source d'énergie utilisée pour la production électrique est le nucléaire (70,6% de la production soit 379,5 TWh) **(Figure 2)**. L'hydraulique est la deuxième source de production d'électricité (11,2% soit 60 TWh) et la principale énergie renouvelable utilisée en France.

En 2019, 79,8% de la production d'électricité a été réalisée à partir d'énergies non-renouvelables (nucléaire, charbon, pétrole, gaz) contre seulement 20,2% de la production réalisée à partir d'énergie renouvelable. **(Figure 3)**



Part des renouvelables dans la production française d'électricité en 2019

(Sites de production raccordés au réseau)

Source RTE - bilan électrique 2019

© EDF

Figure 3 - Part des énergies renouvelables dans la production française d'électricité en 2019 (Source : RTE - bilan électrique 2019)

En 2020, une baisse de la production électrique notable a pu être constatée, en lien avec la crise sanitaire (500,1 TWh produit soit 7 % de moins qu'en 2019) **(Figure 4)**.

La production nucléaire a été fortement affectée (-11,6%) par les restrictions d'activité durant le premier confinement, qui ont conduit à allonger les durées d'arrêt pour maintenance. La production des énergies renouvelables a augmenté du fait d'un parc installé en croissance et de bonnes conditions météorologiques. Permettant ainsi à l'éolien de devenir la troisième source de production électrique devant le gaz en 2020. (Source : RTE – bilan électrique 2020).

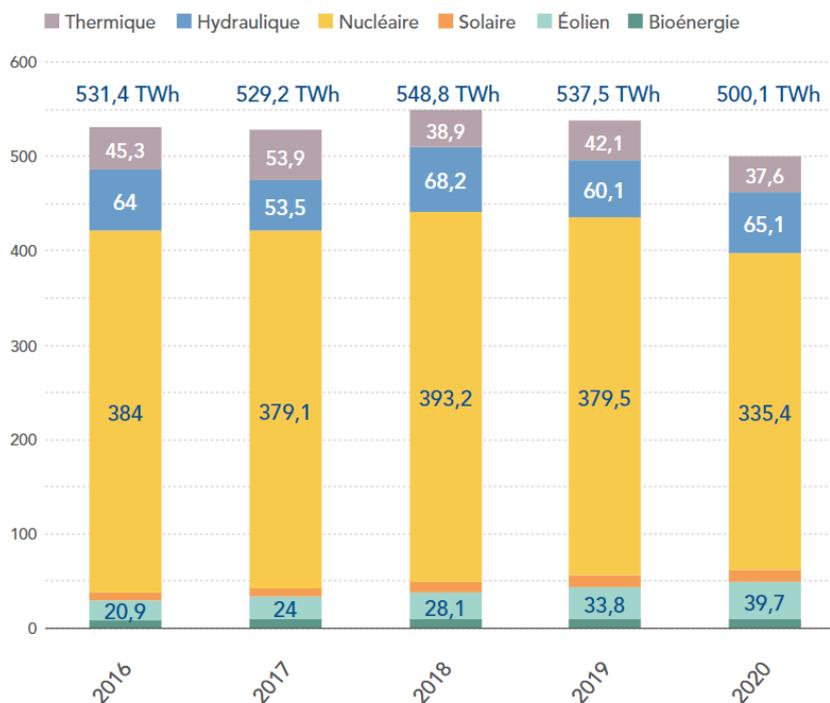


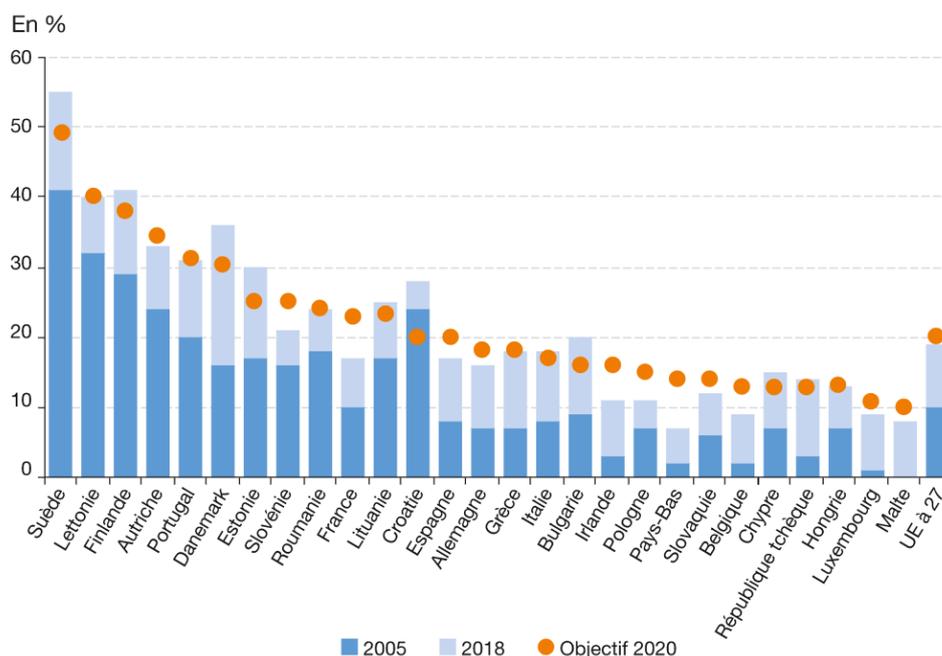
Figure 4 - Evolution de la production électrique en TWh entre 2016 et 2020 en France (Source : RTE - Bilan électrique 2020)

2.1.3. Les engagements européens et français

2.1.3.1. Les engagements européens

En décembre 2008 a été adopté le paquet énergie-climat défini par trois objectifs à l'horizon 2020, appelés « 3 x 20 » :

- Développement à hauteur de 20% des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie (traduit par des objectifs nationaux dans les différents Etats membres) ;
- Réduction de 20% de la consommation totale d'énergie primaire ;
- Baisse des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) d'au moins 20% par rapport à 1990.



Source : I4CE, d'après Eurostat, 2020

Figure 5 - Part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale brute des états membres (Source : I4CE, d'après Eurostat 2020)

En octobre 2014 il a été adopté par le Conseil européen le cadre d'action en matière de climat et énergie à l'horizon 2030 (révisé en 2018) dont les objectifs sont les suivants :

- Développement à hauteur de 32% des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale brute ;
- Réduction de 32,5% de la consommation totale d'énergie primaire ;
- Baisse des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) d'au moins 40% par rapport à 1990.

Ainsi, les énergies renouvelables, associées à l'efficacité énergétique, constituent les piliers de la révolution énergétique qui permettra à l'Union Européenne de réduire ses émissions de GES.

2.1.3.2. Les engagements français

2.1.3.2.1. La politique de développement des énergies renouvelables

Depuis 2007 et le Grenelle de l'environnement, la France met en place une stratégie ambitieuse de développement des énergies renouvelables sur son territoire. Le Grenelle de l'environnement a ainsi identifié la production d'énergies renouvelables comme l'un des deux piliers en matière énergétique, le second étant l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments.

Afin de respecter les engagements européens pris au titre la directive 28/CE/2009 (atteinte d'une part d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation totale d'énergie finale brute française de 23% en 2020 sur la base d'un scénario de référence), la France a adopté une série de mesures en faveur du développement des énergies renouvelables.

En particulier, la loi portant engagement national pour l'environnement, dite « Grenelle 2 » (promulguée le 12 juillet 2011), est un texte d'application et de territorialisation du Grenelle de l'environnement et de la loi Grenelle 1. Il décline chantier par chantier, secteur par secteur, les objectifs entérinés par le premier volet législatif du Grenelle Environnement.

Ainsi, le plan national d'action en faveur des énergies renouvelables pour la période 2009-2020 reprend l'ensemble des politiques et mesures visant à promouvoir l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. Il a été remis à la Commission Européenne en août 2010.

En sus du soutien au développement des énergies renouvelables, afin de poursuivre l'objectif de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre, le Grenelle Environnement renforce les mesures d'économies d'énergie et de performance thermique des bâtiments.

Le 17 août 2015 a été promulgué la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV). Elle s'inscrit dans la continuité du Grenelle de l'environnement de 2007. Ses objectifs en termes de développement des énergies renouvelables sont :

- Augmenter la part des énergies renouvelables à 23% de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32% de cette consommation en 2030 ;
- Atteindre 40 % de la production d'électricité d'origine renouvelable en 2030 ;
- Atteindre 38 % de la consommation finale de chaleur d'origine renouvelable en 2030 ;
- Atteindre 15 % de la consommation finale de carburant d'origine renouvelable en 2030 ;
- Atteindre 10 % de la consommation de gaz d'origine renouvelable en 2030 ;
- Multiplier par 5 la quantité de chaleur et de froid renouvelables et de récupération livrée par les réseaux de chaleur et de froid à l'horizon 2030.

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) a été adoptée en 2020 et sera révisée régulièrement. Elle fixe les priorités d'actions et le chemin de la politique énergétique à suivre au cours de la prochaine décennie afin d'atteindre la neutralité carbone souhaitée en 2050.

2.1.3.2.2. L'intégration des énergies renouvelables dans les bâtiments

- **Remplacement de la RT 2012 par la RE 2020 :**

La réglementation environnementale 2020 (RE 2020) répond à la loi de Transition énergétique pour la croissance verte (LTECV 2015) et à la loi Evolution du logement, de l'aménagement et du numérique (ELAN 2018).

Contrairement à la réglementation thermique 2012 (RT 2012), dont l'objectif était la construction de bâtiment basse consommation (BBC), la RE 2020, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2022, impose la construction de logements ou bâtiments à énergie positive (BEPOS), c'est-à-dire qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. L'objectif est de poursuivre l'amélioration de la performance énergétique et du confort des constructions, tout en diminuant leur impact carbone (prise en compte des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments).

Ainsi, pour connaître leur conformité à la RE2020, les bâtiments neufs à énergie positive seront évalués sur 6 indicateurs correspondant à des exigences minimales :

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

Figure 6 - Indicateurs évalués dans le cadre de la RE 2020 (Source : Guide RE 2020, CEREMA)

L'objectif est donc d'améliorer l'isolation des bâtiments pour réduire les besoins énergétiques en améliorant la conception bioclimatique des bâtiments et de favoriser le recours à des solutions énergétiques renouvelables et peu carbonées.

2.1.3.2.3. Le rôle des collectivités locales

Le rôle des collectivités locales dans la lutte contre le changement climatique et le développement des énergies renouvelables est souligné dans les projets de loi issus du Grenelle de l'environnement :

- Généralisation des Plans Climat- Energie Territoriaux (PCET) (remplacé par le PCAET : Plan climat air énergie depuis juin 2016) aux collectivités de plus de 50 000 habitants avant 2012 (article 7) ;
- Lutte contre le changement climatique (Article 7) : prise en compte des PCET dans les documents d'urbanismes (PLU, PDU) ;
- Energie renouvelables (Article 19) : élaboration d'un schéma régional des énergies renouvelables sur la base des objectifs nationaux et des objectifs qualitatifs et quantitatifs de la région en matière de valorisation du potentiel énergétique renouvelable de son territoire.

En 2018 le pôle métropolitain Caen-Normandie-Métropole a engagé son PCAET.
En 2017, Caen-La-Mer a engagé la réalisation de son schéma directeur énergie.

2.2. Contexte local

2.2.1. Consommations énergétiques de Normandie

D'après l'Observatoire Régional Energie Climat Air de Normandie, les consommations d'énergie s'élevaient à 117 255 GWh en 2018 en Normandie. La plus grande partie des consommations est liée à l'industrie (36,77%). En cumulant l'habitat et le tertiaire, le secteur du bâtiment constitue 32,53% du bilan des consommations d'énergie du territoire.

La figure ci-dessous représente la consommation d'énergie par secteur en 2018.

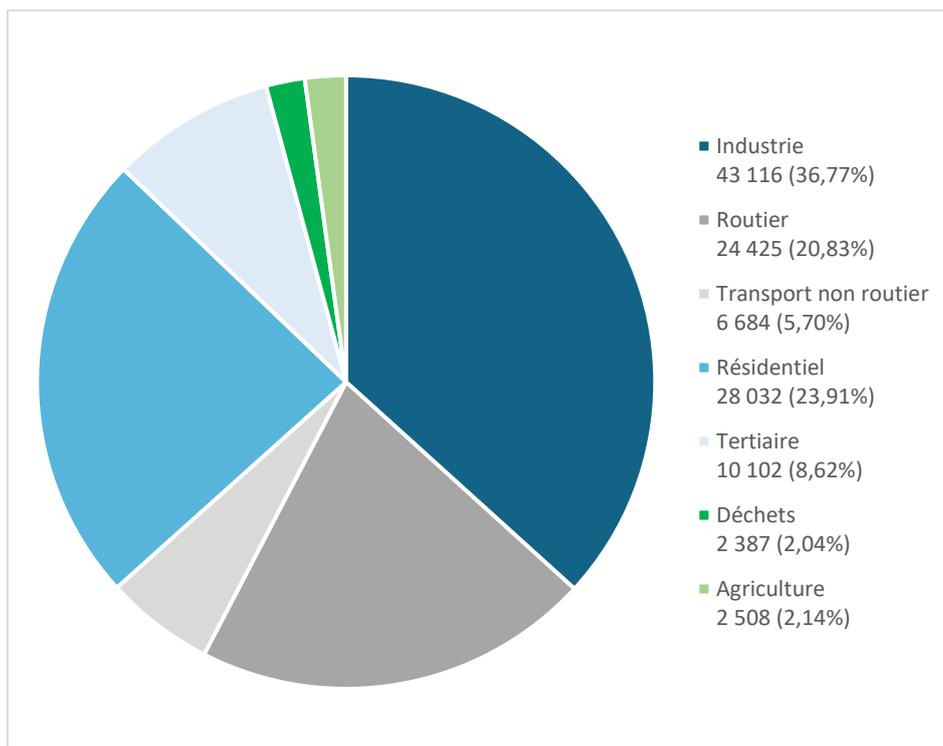


Figure 7 - Consommation d'énergie par secteur en 2018 en GWh (Source : Orecan)

Une nette domination des énergies fossiles est observée en Normandie. 85% de la consommation d'énergie finale de 2018 en Normandie provient de 3 combustibles : les produits pétroliers (41 953 GWh), le gaz naturel (33 109 GWh) et l'électricité (24 613 GWh).

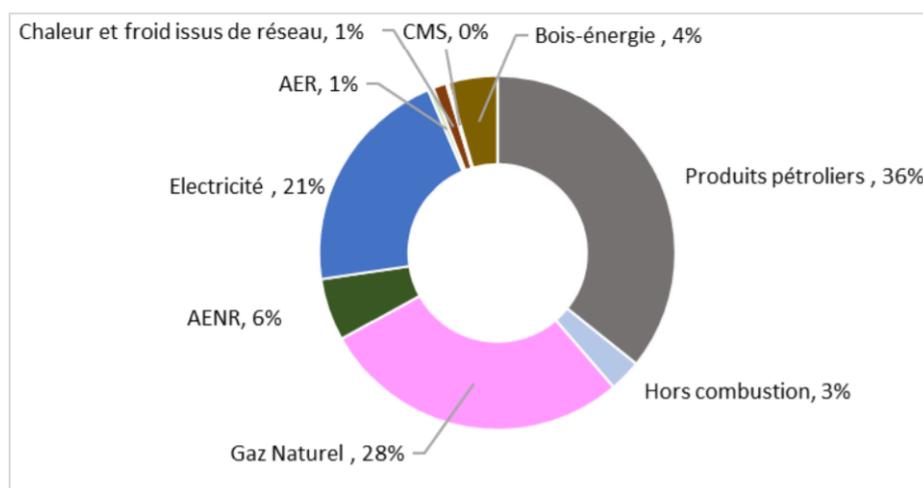


Figure 8 - Répartition de la consommation énergétique par produit énergétique en 2018 en Normandie (Source : Orecan)

La part des énergies renouvelables en Normandie représente 5% du mix énergétique en 2018. Elle est majoritairement issue de la filière Bois-énergie en progression avec 5 240 GWh en 2018. Les « autres énergies renouvelables » (AER) regroupent différents types de biocombustibles comme les biocarburants, le biogaz, la chaleur issue du solaire thermique, les déchets agricoles ou industriels solides (bois), les boues de station d’épuration, etc.

2.2.2. Consommations énergétiques de Caen la mer

Au niveau de la communauté urbaine de Caen la mer, les consommations d’énergie sont estimées à 6 933 GWh en 2018. Le secteur du bâtiment représente 44,63% des consommations du territoire.

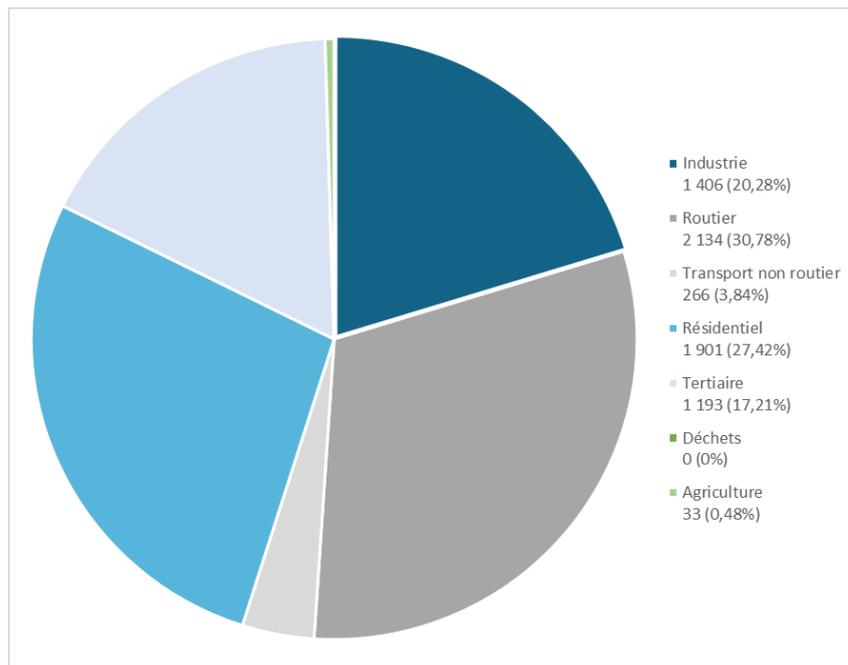


Figure 9 - Consommation énergétique en GWh par secteur d'activité à Caen la Mer en 2018 (Source : Orecan)

Concernant l’origine de l’énergie consommée en GWh sur le territoire de Caen la Mer en 2018, la part des produits pétroliers (36%), du gaz naturel (29%) et de l’électricité (29%) est prédominante. La part des énergies renouvelables est faible (inférieure à 5%).

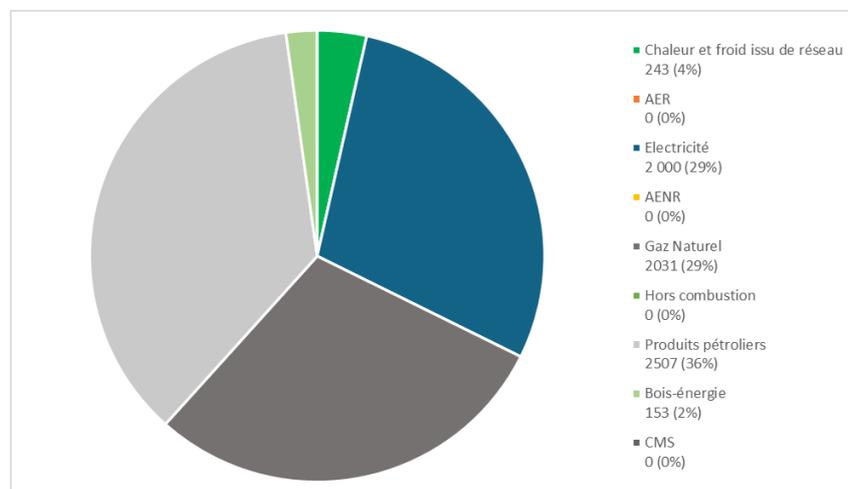


Figure 10 - Origine de l'énergie consommée en GWh sur le territoire de Caen la Mer en 2018 (Source : Orecan)

La consommation d'énergie dans le secteur résidentiel de Caen la Mer est évaluée à 1901 GWh en 2018. Elle est représentée par type d'énergie dans le graphique suivant :

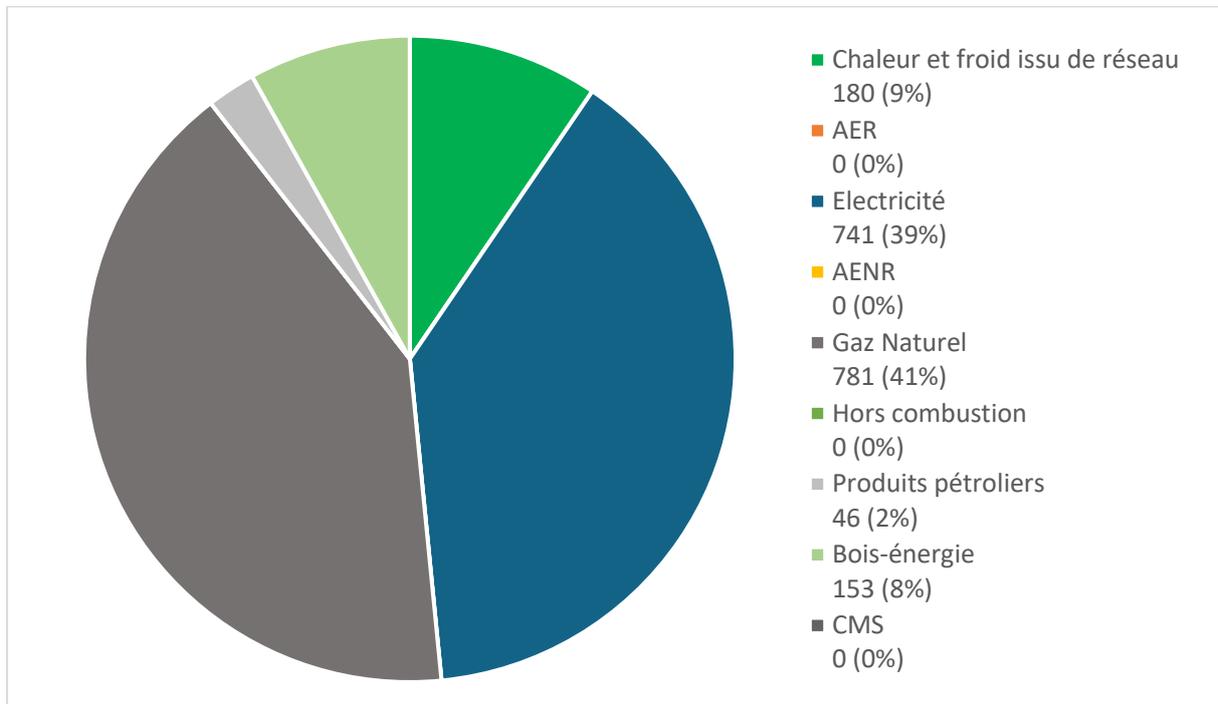


Figure 11 - Consommation d'énergie dans le secteur résidentiel à Caen la Mer en 2018 (Source : Orecan)

Le gaz naturel constitue une part majoritaire de la consommation d'énergie de Caen la Mer dans le secteur résidentiel avec un total de 41%. Le gaz naturel est donc la première énergie consommée pour le résidentiel en 2018. L'électricité est placée en seconde position (39%). On note une part non négligeable des énergies renouvelables notamment par les réseaux de chaleur (9%) (réseau issu de l'incinérateur de Colombelles et réseau de la Guérinière/Grâce de Dieu) et le bois-énergie (8%).

En ce qui concerne le secteur tertiaire, les consommations s'élèvent à 1 192 MWh répartis de la manière suivante :

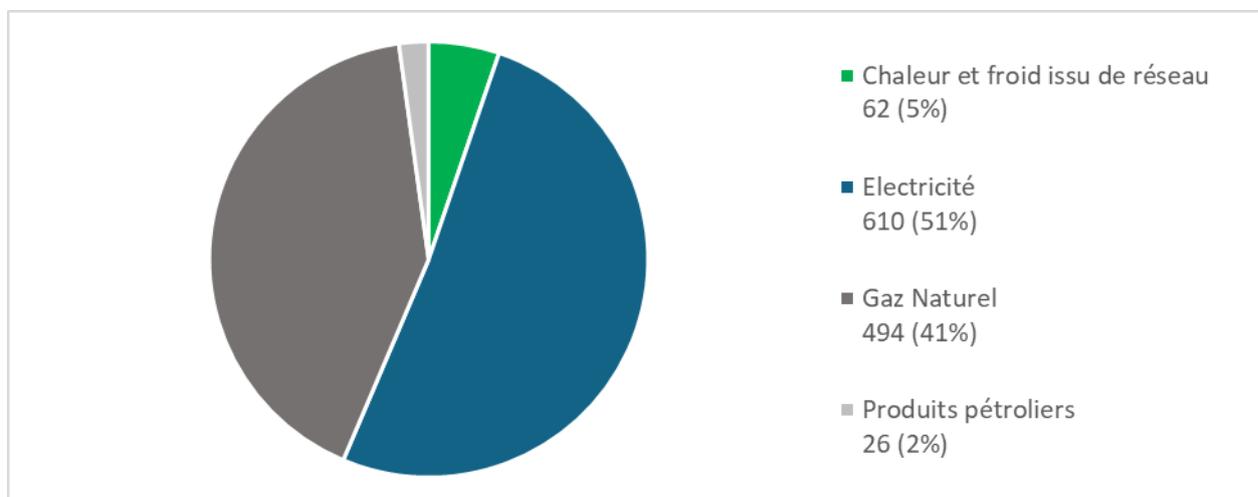


Figure 12 - Consommation d'énergie dans le secteur tertiaire à Caen la Mer (Source : Orecan)

On note là une prédominance de l'électricité avec 610 MWh consommé en 2018 par le secteur tertiaire (soit 51%). Une part importante de l'énergie consommée provient également des énergies fossiles (43% au total) dont 41% pour le gaz naturel et 2% pour les produits pétroliers. La part des ENR reste faible, essentiellement basée sur les réseaux de chaleur existants.

Remarque :

Dans le cadre de la réglementation thermique, la consommation répondant à des besoins en énergie est exprimée en kWhep (kilowattheure d'énergie primaire). L'énergie primaire est la quantité d'énergie nécessaire pour produire une quantité d'énergie disponible pour l'utilisateur final (énergie « finale » ou « utile »). Pour produire un kWh d'énergie finale, la quantité d'énergie primaire varie selon le type d'énergie.

Ainsi, la réglementation considère les équivalences suivantes :

- 1 kWh gaz = 1 kWhep,
- 1 kWh fioul = 1 kWhep,
- 1 kWh électrique = 2,58 kWhep,
- 1 kWh bois = 0.6 kWhep.

Ainsi, la part des besoins en énergie primaire relative aux consommateurs d'électricité est importante. L'utilisation des énergies renouvelables représente donc un intérêt certain pour respecter la réglementation.

3. Présentation du projet

3.1. Contenu du projet

D'après les données fournies par AMENAGEO, la surface du projet est de 5 ha. La surface de plancher totale à créer est d'environ 18 500 m², pour un accueil de 105 logements et 1 bâtiment de commerce(s) et/ou profession(s) libérale(s). Le projet comprend donc :

- 59 lots libres (surface de plancher moyenne ± 250 m²) ;
- 20 maisons groupées (surface de plancher moyenne ± 75 m²) ;
- 26 logements intermédiaires (surface de plancher moyenne ± 75 m²).

Le plan masse fourni par AMENAGEO est présenté ci-dessous.



Figure 13 - Plan de masse du projet fourni par AMENAGEO

3.2. Localisation du projet

Le projet est situé sur la commune de Thue et Mue située dans le département du Calvados à environ 12 km à l'Ouest du centre de Caen. Il se trouve sur les parcelles cadastrées numéro 21-23-24 de la section ZE et sur la parcelle 5 de la section AC.

La localisation du projet est présentée ci-après.

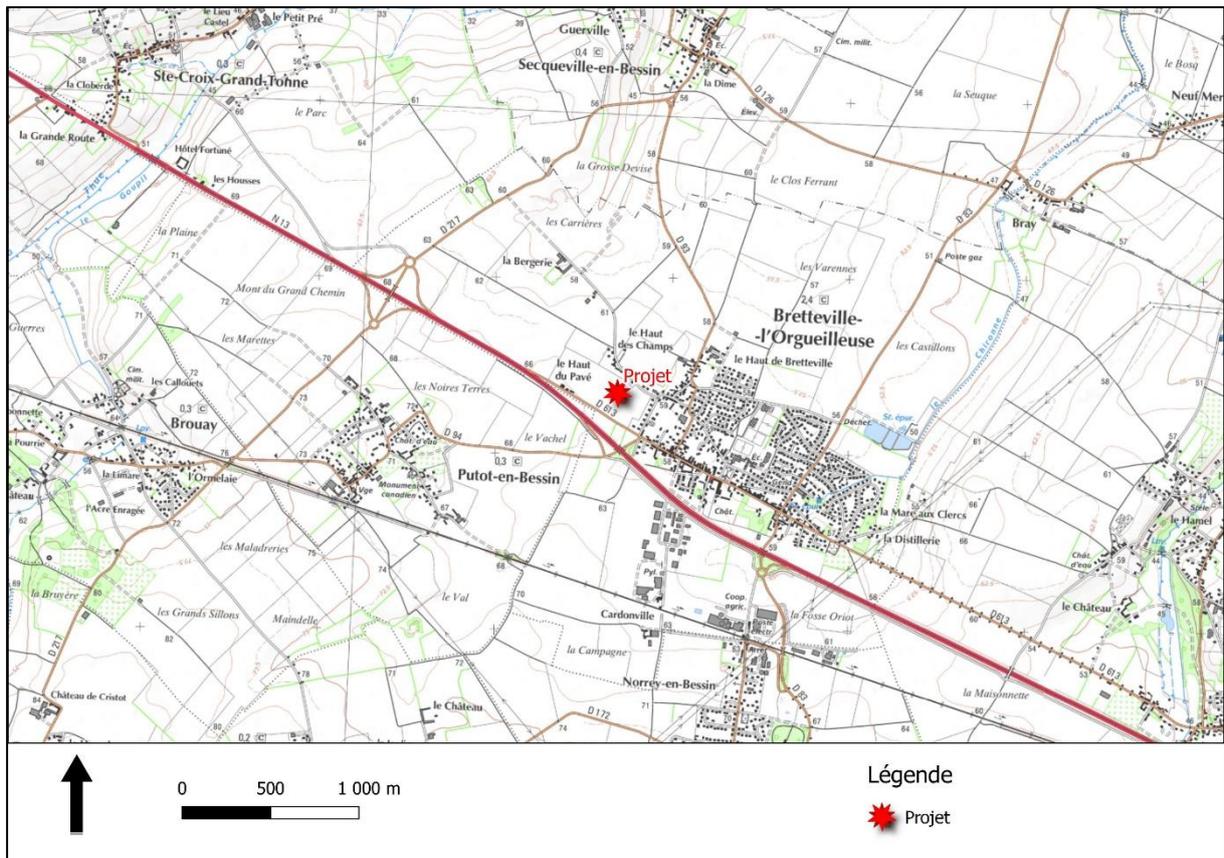


Figure 14 - Localisation du site sur fond IGN



Figure 15 - Localisation du projet sur fond cadastral (Source : Géoportail)

3.3. Besoins énergétiques du projet

La notion de besoin s'exprime en énergie utile (EU). Le besoin est estimé pour chaque usage de l'énergie. La Règlementation Thermique impose des limites à la consommation d'énergie des bâtiments. Ces limites ne peuvent être atteintes qu'à la condition de maîtriser à la source les besoins en énergie. Une enveloppe isolante permettra par exemple de limiter les besoins de chauffage en hiver et de rafraîchissement en été.

Pour ce projet nous nous sommes basés sur les consommations issues de l'application de la RT 2012. Les besoins en énergie se calculent à partir de la SDPC1 des bâtiments, différenciés généralement par nature : logement, tertiaire et activité.

Pour des logements répondant aux exigences de la RE 2020, on pourrait faire l'hypothèse de la répartition suivante des besoins en énergie par m² (hypothèses à valider avec le retour d'expérience de la RE 2020 à venir) :

Tableau 1 – Ratio des besoins énergétiques identifiés

	Habitat individuel (kWh/an)	Habitat collectif (kWh/an)	Activités/commerces (kWh/an)
Chauffage	25	15	22
Refroidissement	0		30
ECS	25		3
Auxiliaires de chauffage	3		10
Eclairage	3		40
Cuisson	6		0
Electricité spécifique	23		90

Ainsi pour les logements les besoins peuvent être calculés de la manière suivante :

Tableau 2 - Besoins en énergie estimés en fonction des données fournies par AMENAGEO

	Habitat individuel (environ 14 750 m ²) (kWh/an)	Habitat collectif (environ 1 950 m ²) (kWh/an)	Maisons groupées (environ 1 500 m ²) (kWh/an)	Bâtiment de commerce(s) et ou profession(s) libérale(s) (environ 300 m ²) (kWh/an)
Chauffage	368 750	29 250	37 500	6 600
Refroidissement	0	0	0	9 000
ECS	368 750	48 750	37 500	900
Auxiliaires	44 250	5 850	4 500	3 000
Eclairage	44 250	5 850	4 500	12 000
Cuisson	88 500	11 700	9 000	0
Electricité spécifique	339 250	44 850	34 500	27 000
TOTAL	1 253 750 kWh/an	146 250 kWh/an	127 500 kWh/an	58 500 kWh/an

La consommation moyenne estimée est donc d'environ 1 586 000 kWh/an.

4. Les infrastructures d’approvisionnement en énergies existantes

4.1.1. Approvisionnement en gaz

La commune nouvelle de Thue-et-Mue est globalement bien desservie en gaz naturel. Toutefois une étude plus approfondie doit être réalisée par GRDF afin d’étudier la faisabilité d’un raccordement du projet au réseau existant.

4.1.2. Approvisionnement en électricité

Le secteur est desservi en électricité par Enedis.

4.1.3. Approvisionnement en chaleur

L’agglomération de Caen-la-Mer dispose de 2 réseaux de chaleur principaux. Ces réseaux sont situés à Hérouville Saint Clair pour l’un et à la Guérinière/grâce de Dieu pour l’autre. Ces deux réseaux sont trop éloignés (environ 13 km) du site du projet pour pouvoir être utilisés dans le cadre du projet d’une manière rationnelle et économiquement viable.

Les autres réseaux de chaleur existants sont des réseaux privés qui sont également très éloignés du site du projet.

5. Gisements énergétiques de la zone d'étude

Les potentiels de gisement d'énergies renouvelables sur le territoire de Caen la Mer sont les filières suivantes :

- L'énergie éolienne ;
- L'énergie solaire ;
- Bois-énergie ;
- La méthanisation (à partir d'effluents du cheptel, des eaux usées et des déchets),
- La récupération de chaleur sur eaux usées ;
- La géothermie ;
- La micro-hydroélectricité.

On peut d'ores et déjà exclure la micro-hydroélectricité car le secteur du projet n'est pas proche d'un cours d'eau.

5.1. L'énergie éolienne

5.1.1. Principes

L'énergie mécanique du vent est considérée comme une énergie renouvelable. Les vents sont des mouvements de masse d'air qui sont générés à partir de l'énergie solaire et la rotation de la Terre. Une éolienne transforme alors l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par l'intermédiaire d'une hélice.

Idéalement, la loi de Betz détermine le rendement optimum d'une installation éolienne. Ainsi, il est admis qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27ème de l'énergie cinétique contenue dans le vent. D'autre part, en considérant les rendements maximums des générateurs électriques actuels (de l'ordre de 30 %), une éolienne atteint, à l'optimum, 18 % de rendement.

L'éolien comprend des machines de quelques Watts de puissance à plusieurs MW :

- Les éoliennes de grande puissance, jusqu'à 2,5 MW et d'une hauteur totale de 60 à 120 m, composent la plupart des parcs éoliens mis en projet aujourd'hui.
- Les éoliennes de moyenne puissance, 200-400 kW et inférieures à 50-60 m de hauteur, sont souvent isolées et appartiennent en général à des acteurs locaux.
- Les éoliennes de faible puissance, inférieures à 10 kW, sont de types très variables, elles sont souvent individuelles et non raccordées au réseau public.

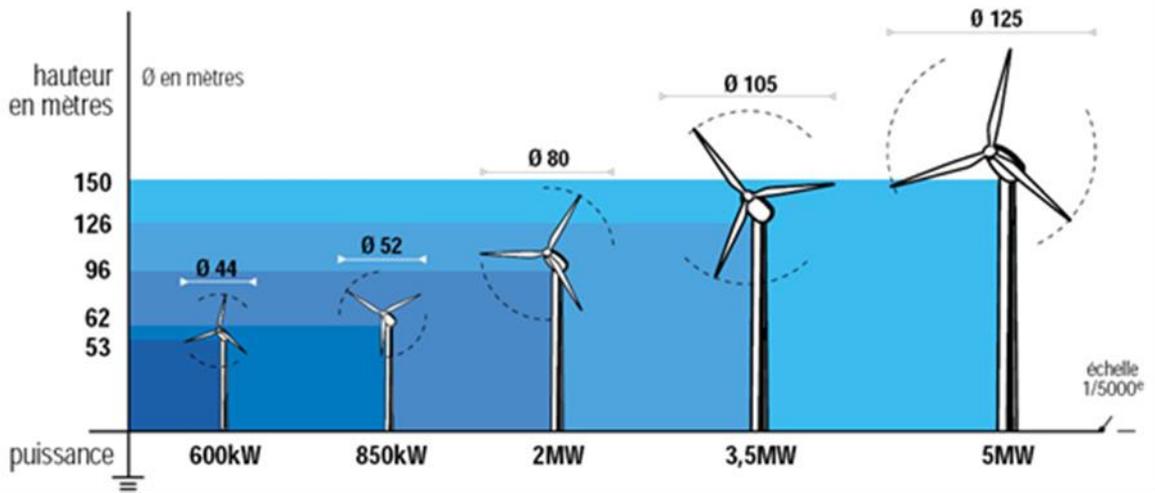


Figure 16 - Rapport entre la taille et la puissance d'une éolienne (Source : les 7 vents du Cotentin)

- **Grandes et moyennes éoliennes :**

Les éoliennes produisent dès que la vitesse du vent atteint 15 km/h et jusqu'à 90 km/h. Leur rendement devient optimal à partir de 50 km/h.

Le « moyen éolien » comprend les éoliennes dont la puissance est comprise entre 36 kW et 350 kW tandis que le « grand éolien » comprend les éoliennes dont la puissance est supérieure à 350 kW.

Les éoliennes de grande et moyenne puissance ne sont pas adaptées au milieu urbain. Si on les rencontre dans certaines zones industrielles, elles sont peu compatibles avec les espaces dédiés à l'habitat.

- **Petites éoliennes :**

Depuis quelques années, un nouveau type d'éoliennes de petite taille et de petite puissance destinées à être implantées en milieu urbain a vu le jour. Cette nouvelle technologie permet d'élargir le choix en matière d'énergies renouvelables.

Le « petit éolien » regroupe les éoliennes dont la puissance est inférieure à 36 kW. Une éolienne d'une puissance de 5 kW, qui tourne 2 000 heures par an à sa puissance nominale, produira l'équivalent de la consommation d'un ménage (Source : EDF).

Les éoliennes urbaines sont des aérogénérateurs de quelques centaines de Watts à quelques dizaines de kW. Ce sont des turbines adaptées à un nouveau potentiel énergétique qui impose des contraintes particulières que sont la turbulence, des vitesses de vent affectées par l'environnement, les vibrations, le bruit ou encore les considérations d'aménagement. Elles peuvent se classer en deux grandes catégories suivant l'orientation de l'axe de leurs pales, horizontal ou vertical. Elles peuvent être implantées sur les toitures.

Cependant, ces petites éoliennes en milieu urbain sont des produits appartenant à un marché de niche encore naissant. Les installations et les connexions au réseau sont également assez limitées. Par conséquent, pour voir grandir ce marché, un effort de communication, d'accès à l'information et surtout d'incitations doit être réalisé essentiellement dans les domaines de la régulation, des procédures administratives ou encore des questions de coûts.

Chiffres clés de l'éolien (Ademe 2016):

> En France, le coût total de production de l'éolien terrestre est estimé entre 54€/MWh et 108€/MWh pour les machines standard, et entre 50 €/MWh et 94€/MWh pour les éoliennes plus toilées.

5.1.2. Aspects réglementaires

- **Pour les éoliennes mesurant moins de 12 m (hauteur du mât = distance entre le sol et le haut de la nacelle) :**

Elles peuvent être implantées sans autorisation préalable, ni permis de construire, sauf dans les sites interdits mentionnés plus bas.

Le projet d'installation doit respecter toutes les dispositions réglementaires concernant l'utilisation des sols, l'implantation, la destination, la nature, l'architecture, les dimensions, l'assainissement des constructions et l'aménagement de leurs abords.

- **Pour les éoliennes mesurant plus de 12 m :**

L'installation d'une éolienne comprise entre 12 m inclus et 50 m est soumise à la délivrance d'un permis de construire. Une demande en 4 exemplaires doit être déposée en mairie quel que soit la finalité de la production d'énergie.

Le projet d'installation doit également respecter toutes les dispositions réglementaires concernant l'utilisation des sols, l'implantation, la destination, la nature, l'architecture, les dimensions, l'assainissement des constructions et l'aménagement de leurs abords.

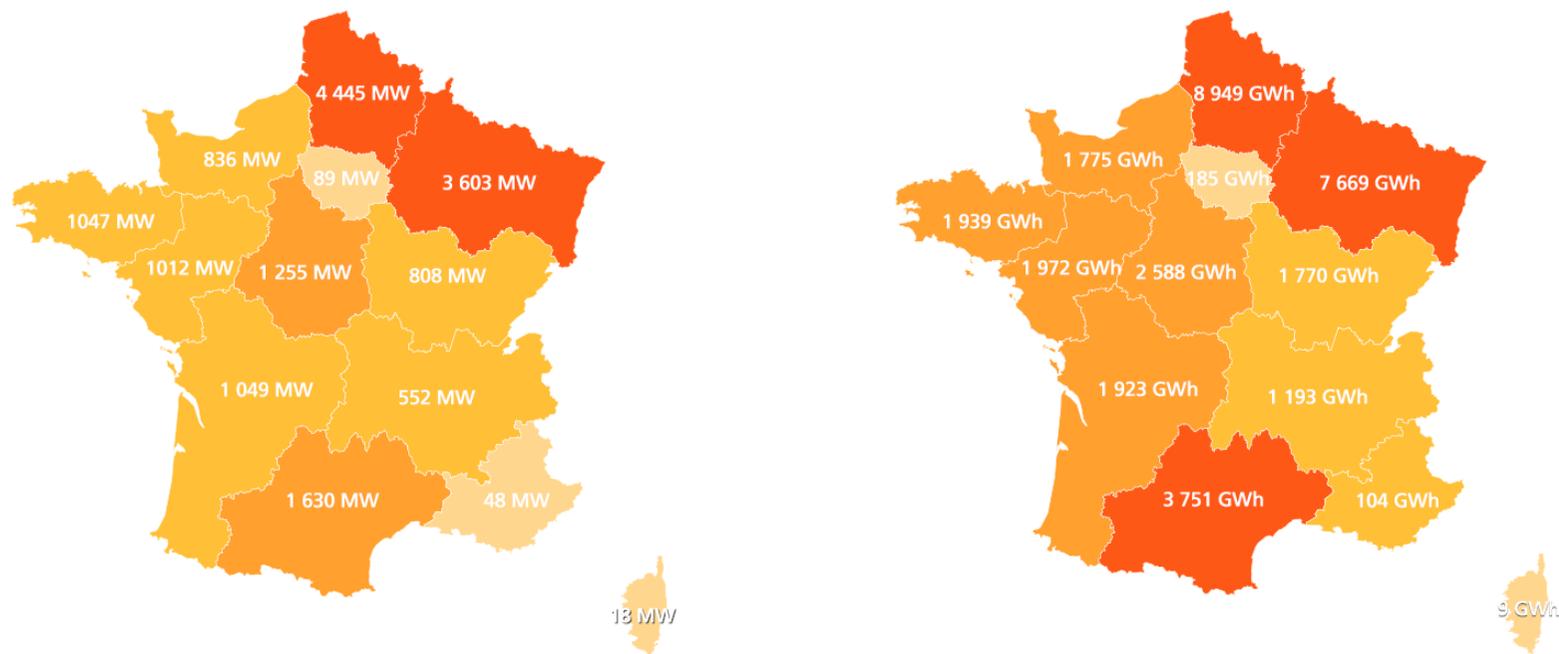
De manière générale, l'installation d'une éolienne domestique, quel que soit sa taille, est **interdite** :

- Dans les zones protégées : parcs nationaux et réserves naturelles ;
- Dans les zones militaires ;
- Sur les immeubles ou sites classés ou inscrits au titre des monuments historiques, ainsi que dans les zones de protection qui les entourent (dans un rayon de 500 m) ;
- Lorsque le plan local d'urbanisme (PLU) l'interdit.

Il existe des aides financières à l'achat d'une éolienne, délivrées notamment par les collectivités locales et le fonds d'amortissement des charges d'électrification (FACE).

5.1.3. Potentiel régional

En termes de puissance raccordée la France se situe à la 4^{ème} place de l'Union Européenne en 2015. Au sein du territoire français la Normandie présente une puissance raccordée et une production assez bonne. En 2019, la puissance raccordée du territoire normand est de 836 MW et la production de 1 775 GWh.



Éolien : puissance raccordée par région en 2019

Source RTE - Bilan électrique 2019

© EDF

Éolien : production par région en 2019

Source RTE - Bilan électrique 2019

© EDF

Figure 17 - Répartition de la puissance raccordée et de la production éolienne par région en 2019

La Normandie est une région relativement bien exposée aux vents comme le montre la carte ci-après. Le territoire de Caen La Mer est favorablement desservi par le vent, avec des vents moyens atteignant 5,5 à 7,5 m/s, soit une ressource permettant le développement du grand éolien.

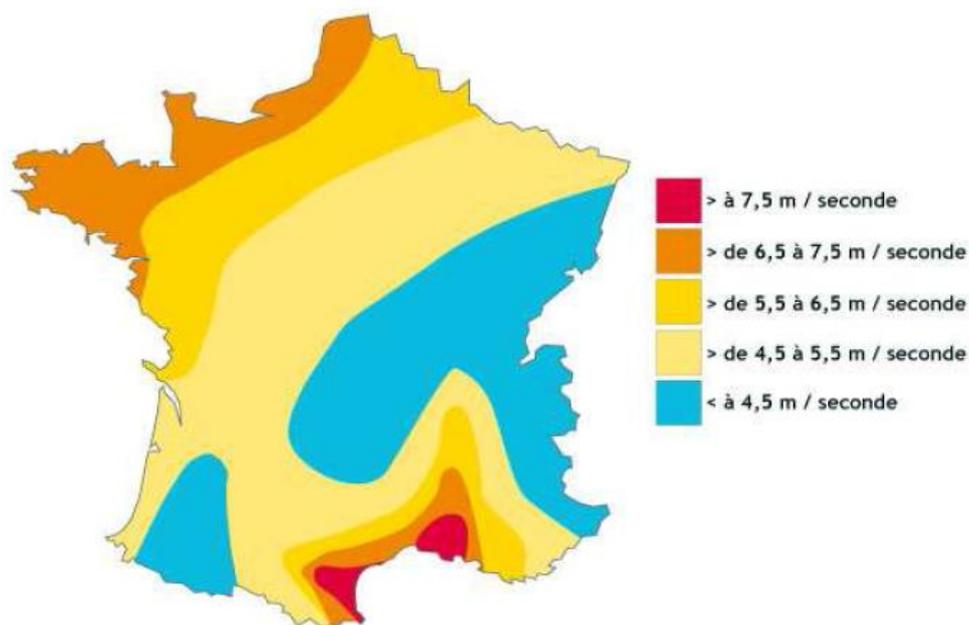


Figure 18 - Cartes des vents pour la France (Source : étude du potentiel en énergies renouvelables de Caen métropole (Explicit))

5.1.4. Potentiel local

D'après le schéma régional éolien de Basse-Normandie (septembre 2002), la commune de Bretteville-l'Orgueilleuse est située en partie en « zone favorable préférentiellement au petit éolien » et en partie en zone « favorable au grand éolien ».

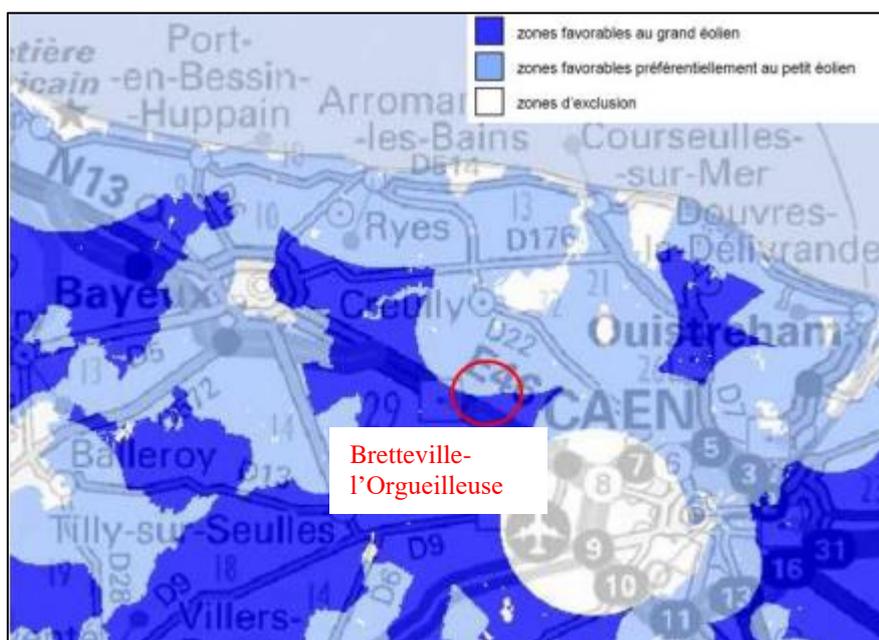


Figure 19 - Extrait de la cartographie des zones favorables à l'éolien (Source : Schéma régional éolien de Basse-Normandie, septembre 2012)

Le parc éolien le plus proche est situé sur la commune d’Audrieu à environ 6,6 km à l’Est du projet.

La station météorologique la plus proche du projet est Caen-Carpique. Elle est située à environ 6 km au sud-est du projet. D’après la rose des vents de la station réalisée à partir de données mesurées entre 1991 et 2010 la provenance principale des vents est le sud-ouest. C’est également dans cette direction que les vents sont les plus forts. En effet, 72% des vents d’une vitesse supérieure à 8 m/s proviennent de cette direction. C’est près de 8 jours sur l’année qui connaissent des rafales de vents d’une vitesse supérieure ou égale à 8 m/s.

A Caen, la moyenne annuelle de vitesse des vents mesurées sur dix minutes est de 4,6 m/s.

Tableau 3 - Vitesse du vent moyenné sur 10 minutes (en m/s) de 1981-2010 (Source : Météo France)

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moyenne
Vitesse moyenne de vent (m/s)	5,6	5,2	5,1	4,6	4,2	3,9	4,0	4,0	4,1	4,6	4,8	5,1	4,6

Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs trihoraires entre 0h00 et 21h00, heure UTC

Tableau de répartition
Nombre de cas étudiés : 58440
Manquants : 14

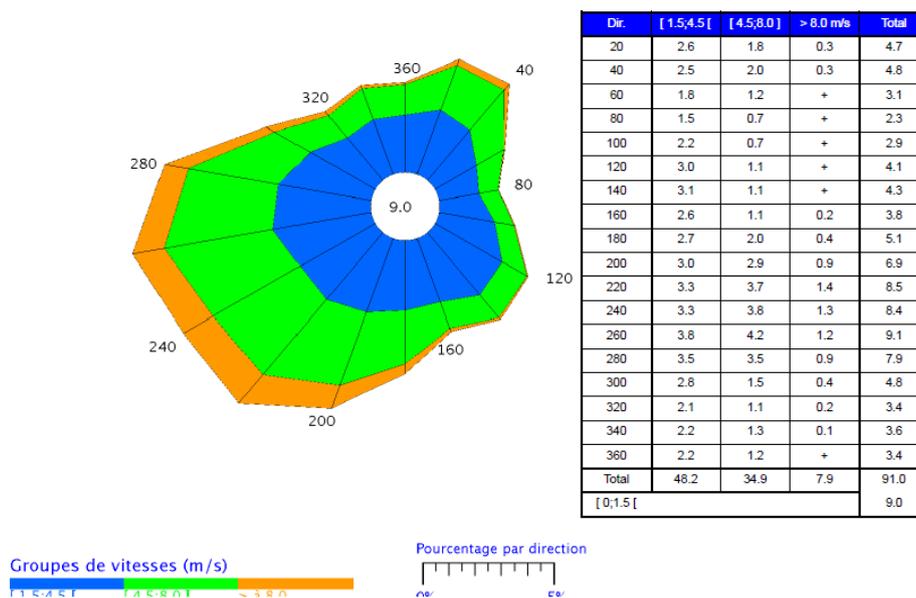


Figure 20 - Rose des vents de la station de Caen-Carpique (Source : Météo France)

D’après le Plan Local d’Urbanisme de la commune de Bretteville-l’Orgueilleuse, en ce qui concerne la zone 1AU (correspondant à la zone du projet) et la zone A, il est précisé que :

« Les installations de production d’électricité utilisant l’énergie mécanique du vent sont autorisées sous réserve :

- De ne pas représenter un risque pour la santé, pour la sécurité ou une atteinte au paysage, au titre de l'article R.111-2 (risque pour la sécurité) et de l'article R.111-21 (atteinte au paysage),
- D’être intégrés au bâti ou à son environnement,

- *De ne pas créer de nuisances notamment : des nuisances sonores continues (quel qu'en soit le degré), des vibrations sensibles (notamment de basses fréquences), des ombres portées issues d'une installation de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent sur une habitation voisine.*

Les pièces de la demande d'autorisation d'urbanisme illustreront le respect de ces dispositions. Par ailleurs, un bâtiment à usage d'activités portant sur une surface de plancher supérieure ou égale à 10 000 m² devra être raccordé à des dispositifs d'énergie renouvelable ou valorisable capables de couvrir au moins 80 % de ses besoins en énergie (hors besoins frigorifiques et de production, un effort devant néanmoins être porté sur ces deux besoins). A défaut, il devra pouvoir faire état de l'achat d'au moins 80 % d'énergie d'origine renouvelable pour répondre à ses besoins en énergie. »

A noté qu'un projet de parc éolien sur la commune déléguée voisine, Sainte-Croix-Grand-Tonne, a été avorté en 2021 suite à des pétitions et après refus de la mise en place du projet par la commune.

Le secteur d'étude est situé en périphérie d'une zone urbanisée et de terres agricoles. Aux vues de l'occupation du territoire et des prescriptions du PLU de la commune, le projet ne semble pas entièrement compatible avec l'implantation de grandes et moyennes éoliennes. La mise en œuvre de petites éoliennes semble plus favorable.

Deux petites éoliennes de 6 kW sont installées sur le site des services techniques municipaux de la Cotonnière, au Nord-Ouest de Caen.

D'une manière générale, il est difficile d'évaluer le potentiel d'installation d'une éolienne urbaine. Cependant quelques règles permettent de choisir un emplacement pour une meilleure exploitation de la ressource :

- Le toit doit être bien au-dessus de la hauteur moyenne des constructions environnantes,
- Dans le contexte urbain du projet, il convient de privilégier une éolienne à axe vertical adaptée aux flux turbulents et qui permet d'éviter de surélever l'installation par rapport au bâtiment, comme c'est le cas pour une éolienne à axe horizontal,
- La rose des vents doit indiquer une vitesse moyenne d'au moins 5 m/s, ce qui est le cas du secteur d'étude (moyenne de 9 m/s).

Les gammes de puissance électrique disponible fournies par ces éoliennes sont de l'ordre de 2 à 20 kW. **La production d'électricité d'une éolienne urbaine est donc relativement faible et ne permettrait pas de répondre aux besoins énergétiques du projet.**

En plus de ces contraintes techniques, les contraintes économiques, la faible maturité de la filière, la réticence de la population et les incertitudes réglementaires sont autant de frein à la production de ce type d'énergie.

5.1.5. Impact sur l'environnement

La production d'énergie éolienne nécessite la réalisation d'une étude d'impact. En effet, à l'échelle locale, il existe un risque que les vents changent, s'intensifient ou s'atténuent, ce qui influencerait sur la performance des parcs en place. De plus, la présence de grandes centrales éolienne peut provoquer la déviation d'un couloir de vent : ainsi l'installation des mâts et leur orientation doivent être pensées à cet effet.

Au niveau national et planétaire, les retombées environnementales de l'éolien sont nettement favorables. L'électricité issue de l'éolien n'est pas génératrice de GES en phase de production. L'éolien s'avère ainsi être une alternative dans une optique de lutte contre le réchauffement climatique.

Cependant, l'acceptation locale, soucieuse des éventuelles nuisances sonores ou visuelles, peut constituer une contrainte significative

5.1.6. Exemples d'applications



Figure 21 - Eoliennes à axe horizontal de la Communauté d'Agglomération de Caen la Mer



Figure 22 - Petite éolienne à axe vertical de type Darrieus (Source : Anemoos) (à gauche) et éolienne à axe vertical (Source : Qientrevolution) (à droite)

5.2. L'énergie Solaire

5.2.1. Principe

L'énergie solaire permet de produire chaleur ou électricité à travers différents procédés de captation. L'énergie solaire est une source d'énergie disponible partout et renouvelable, son utilisation dans la production d'énergie est non polluante. Différents enjeux existent pouvant rendre difficile son exploitation : coûts de conception/fabrication élevés, faible rendement énergétique, contraintes de stockage de l'énergie, etc.

5.2.1.1. Le solaire passif

Le solaire passif regroupe les solutions qui utilisent passivement l'énergie du soleil pour l'éclairage naturel, le chauffage des locaux et leur climatisation via notamment l'absorption des rayons du soleil à travers les fenêtres et les baies vitrées. Le solaire passif s'intègre donc plutôt à la conception du bâtiment et consiste à intégrer au mieux le bâtiment dans son environnement en profitant de façon optimale des apports solaires par le choix des matériaux, la disposition des ouvertures, l'exposition de l'habitation, la disposition des pièces, etc.

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

- Prévoir les façades principales des bâtiments au sud,
- Assurer un recul suffisant entre les bâtiments pour permettre un accès au soleil au Sud dans les conditions les plus favorables,
- Assurer une bonne répartition de la fenestration,
- Choix de matériaux à masse thermique importante (bon potentiel de stockage thermique).

5.2.1.2. Le solaire actif

Au-delà de l'usage passif de l'énergie solaire, il existe diverses applications permettant d'exploiter indirectement cette énergie. L'ensemble de ces technologies est regroupé sous la dénomination : solaire actif.

Trois grands types d'applications peuvent être envisagés :

- Le **solaire photovoltaïque** : la conversion de l'énergie solaire en électricité par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques,
- Le **solaire thermique** : l'ensemble des applications destinées à la production de chaleur, par l'intermédiaire de capteurs et de concentrateurs,
- Le **solaire à concentration** : vaporisation de l'eau pour alimenter une turbine.

5.2.1.2.1. Le solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Ils fonctionnent par intermittence, et peuvent fonctionner par temps clair ou diffus.

Les technologies de cellules les plus utilisées sont celles des cellules monocristallines, polycristallines et couches minces (amorphe) :

- Les **modules cristallins** – rendement de l'ordre de 12 à 20 % – dominant actuellement le marché, ils ont un rendement élevé et une longue durée de vie (30 ans environ). Les cellules cristallines sont plutôt utilisées pour les fenêtres ou les façades ainsi que les toitures lorsque l'espace est limité,
- Les **modules en couches minces** - rendement de l'ordre de 7 à 13% - sont créés par le dépôt d'une couche mince de semi-conducteurs sur une surface homogène et lisse (verre, métal, plastique flexible etc.). Malgré leur rendement inférieur à celui des cellules cristallines, leur fabrication exige moins de semi-conducteurs d'où un coût moindre au mètre carré. Cependant le coût au kWc est équivalent pour les deux systèmes. Les produits en couches minces sont particulièrement adaptés aux endroits où la surface à couvrir est importante (toitures, bâtiments industriels),
- Les **cellules à base de photovoltaïque organique** – rendement de l'ordre de 3 à 5% - leur principe de fonctionnement est basé sur les cellules à colorant de Michaël Grätzel avec des variations sur le type de matériaux utilisés. Leur durée de vie reste toutefois limitée.

Exploitation de l'électricité photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques peuvent être raccordés au réseau électrique ou utilisés en site isolé.

Au niveau de l'interface avec le réseau, deux options de branchement sont possibles :

- **L'injection de la totalité de la production** sur le réseau : dans ce cas, l'intégralité de la production est vendue au tarif réglementé. Un point de branchement spécifique à la production est alors créé par le gestionnaire de réseau de distribution. Toute la consommation est par ailleurs comptabilisée par un compteur de consommation,
- **L'injection des excédents (ou surplus) de la production** sur le réseau : dans ce cas, la production électrique consommée sur place par les appareils en cours de fonctionnement n'est pas comptabilisée par le compteur de production, mais vient réduire le décompte de la consommation. Seul le surplus de la production par rapport aux consommations instantanées est vendu.

La technologie de la production d'électricité du photovoltaïque raccordée au réseau et intégrée au bâti est aujourd'hui techniquement maîtrisée. Les modules photovoltaïques ont obtenu toutes les validations techniques. La durabilité du matériel en soit et la garantie de capacité de production (20 à 26 ans pour les cristallins) sont telles que les panneaux photovoltaïques, lorsqu'ils sont intégrés à un bâtiment, disposent souvent d'une durée de vie garantie plus longue qu'un grand nombre de composants du bâtiment.

Dans le cadre de la construction d'un bâtiment neuf, le système photovoltaïque est inclus dans la demande de permis de construire. Pour un bâtiment existant, une déclaration préalable de travaux auprès de la mairie est à effectuer. Après instruction, celle-ci délivrera un certificat de non-opposition à la déclaration préalable.

Dans les deux cas, une demande de raccordement au réseau électrique est ensuite à effectuer auprès du gestionnaire de réseau de distribution d'électricité. Celui établira par la suite une proposition de

raccordement au réseau (PDR) après étude de la faisabilité, du prix et des délais prévisionnels. Cette proposition sera accompagnée d'un contrat de raccordement (CRAE)

Chiffres clés du solaire photovoltaïque (Ademe 2016): > En France, le coût total de production du photovoltaïque (technologie silicium) des centrales au sol est estimé entre 64 €/MWh et 167 €/MWh, le coût total de production en toiture pour le résidentiel est estimé entre 164 €/MWh et 407 €/MWh pour les installations intégrées au bâtiment (IAB) et entre 155 €/MWh et 334 €/MWh pour les installations surimposées, et le coût total de production en toiture pour les secteurs commercial et industriel est estimé entre 98 €/MWh et 246 €/MWh.

5.2.1.2.2. Le solaire thermique

Le solaire thermique correspond à la conversion du rayonnement solaire en énergie calorifique, à plusieurs niveaux de température. Traditionnellement, ce terme désigne les applications à basse et moyenne température dans le secteur du bâtiment, les plus répandues sont le chauffage de piscines, la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage de locaux. Les applications hautes températures sont le plus souvent rassemblées sous le terme solaire thermique à concentration et sont quant à elles réservées au secteur de l'électricité ou de l'industrie.

Exploitation du solaire thermique :

Un capteur solaire thermique permet de transférer l'énergie du rayonnement solaire à un fluide qui va chauffer. L'eau chaude (jusqu'à 80°C) ainsi produite peut avoir plusieurs utilisations :

- Eau chaude sanitaire le plus souvent, dans le cas des Chauffe-Eau Solaire Collectifs (CESCI) et/ou individuels (CESI) ;
- Chauffage de l'habitation, c'est le cas des Systèmes Solaires Combinés (SSC) ;
- D'autres applications comme le chauffage de l'eau des piscines.

Le principe d'une installation d'eau chaude solaire est donc simple : l'eau sanitaire est préchauffée par le solaire, un appoint apporte le complément d'énergie nécessaire. Cet appoint peut être fourni par une énergie classique, une autre énergie renouvelable, comme le bois ou une PAC, ou un réseau de chaleur.

Chiffres clés du solaire thermique (Ademe 2016): En France, le coût total de production de la filière solaire thermique est estimé entre 156 €/MWh et 451 €/MWh pour les chauffe-eau solaires individuels (CESI), et entre 191 €/MWh et 420 €/MWh pour les systèmes solaires combinés (SSC), pour le nord et le sud de la France.

5.2.1.2.3. Le solaire à concentration

Le solaire à concentration nécessite une ressource particulièrement dense, comme c'est le cas dans des zones de fort ensoleillement (Afrique du Nord, Nord de l'Australie...). En Normandie, cette ressource est insuffisante.

5.2.2. Aspects réglementaires

L'installation de capteurs solaires participe à l'aspect bâti et architectural de la construction et nécessite une déclaration ou une autorisation à construire. L'obtention de cette autorisation est un préalable à toute installation, quelle que soit sa taille.

Dans la plupart des cas, l'autorisation sera une déclaration de travaux exemptée de permis de construire (DTEPC) comme défini dans l'article R422-3 du code de l'urbanisme. En effet, dans la mise en place d'un chauffe-eau individuel seul ou pour les installations collectives, les articles R422-2 du code de l'urbanisme et 30 de la loi de programme du 13 juillet 2005, fixant les orientations de la politique, définissent le cadre légal du projet.

Article R422-2 du Code de l'urbanisme :

« Le préfet est compétent pour délivrer le permis de construire, d'aménager ou de démolir et pour se prononcer sur un projet faisant l'objet d'une déclaration préalable dans les communes visées au b de l'article L. 422-1 et dans les cas prévus par l'article L. 422-2 dans les hypothèses suivantes : [...] Pour les ouvrages de production, de transport, de distribution et de stockage d'énergie lorsque cette énergie n'est pas destinée, principalement, à une utilisation directe par le demandeur ;

Article 31 de la loi du 13 juillet 2005 :

« Recommander l'utilisation des énergies renouvelables pour l'approvisionnement énergétique des constructions neuves, en fonction des caractéristiques de ces constructions, sous réserve de la protection des sites et des paysages. »

Dans le cas d'un bâtiment neuf, les capteurs solaires deviennent un élément de composition architecturale dont il faut tenir compte dans le permis de construire. Enfin, dans certains cas de figure plus spécifiques, l'autorisation peut prendre la forme d'un permis de construire. C'est le cas lorsque les capteurs solaires font partie d'un projet de réhabilitation complet du bâtiment et participent à la nouvelle architecture du bâti.

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, bénéficient actuellement de conditions particulières d'obligation d'achat. Cela se traduit par l'obligation donnée au gestionnaire du réseau électrique d'acheter la production injectée sur le réseau à un tarif réglementé (c'est-à-dire imposé par la loi). L'arrêté actuellement en vigueur est l'arrêté du 11 mai 2017 qui concerne les nouveaux projets. Les tarifs sont garantis sur une durée de 20 ans. Les tarifs d'achat sont ajustés chaque trimestre.

Dans le cadre de l'installation de panneaux solaires au sol une autorisation d'urbanisme est nécessaire ou non selon la hauteur de l'installation par rapport au sol et sa puissance de crête (la puissance maximale délivrée par le panneau).

Tableau 4 - Autorisation d'urbanisme exigée pour la pose de panneaux solaires au sol

Autorisation d'urbanisme exigée			
Hauteur/Puissance crête	Inférieure à 3 kW	Entre 3 et 250 kW	Supérieur à 250 kW
Jusqu'à 1,80 m	Dispensé de formalité	Déclaration préalable de travaux	Permis de construire
Au-delà de 1,80 m	Déclaration préalable de travaux		

Concernant l'installation de panneaux solaires sur un toit, il est nécessaire de réaliser une déclaration préalable de travaux, en raison du changement d'aspect réalisé.

D'après le PLU de Bretteville-l'Orgueilleuse, pour la zone 1AU (zone du projet) : « les panneaux solaires, vitrages, toitures végétalisées sont autorisées, sous réserve de produire un ensemble harmonieux et/ou une architecture contemporaine de qualité. »

5.2.3. Potentiel régional

D’après la carte ci-dessous, la région de Caen possède un ensoleillement moyen de 3,4 kWh/m²/j (valeur prenant en compte le rayonnement direct du soleil et le rayonnement diffus). Pour autant, ce niveau est suffisant pour permettre l’installation d’équipements solaires.

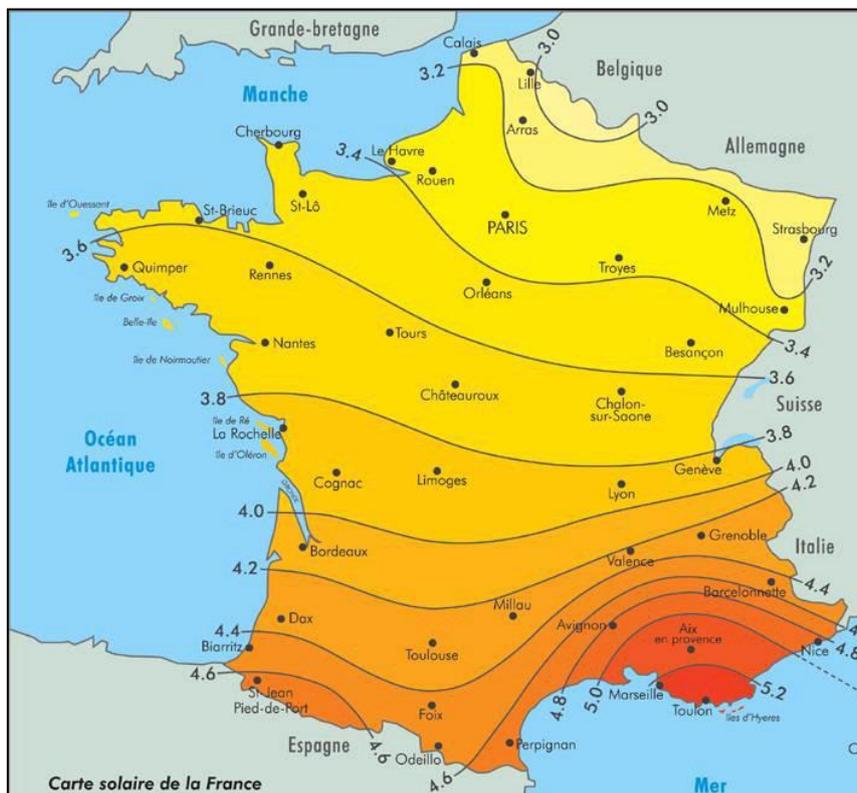
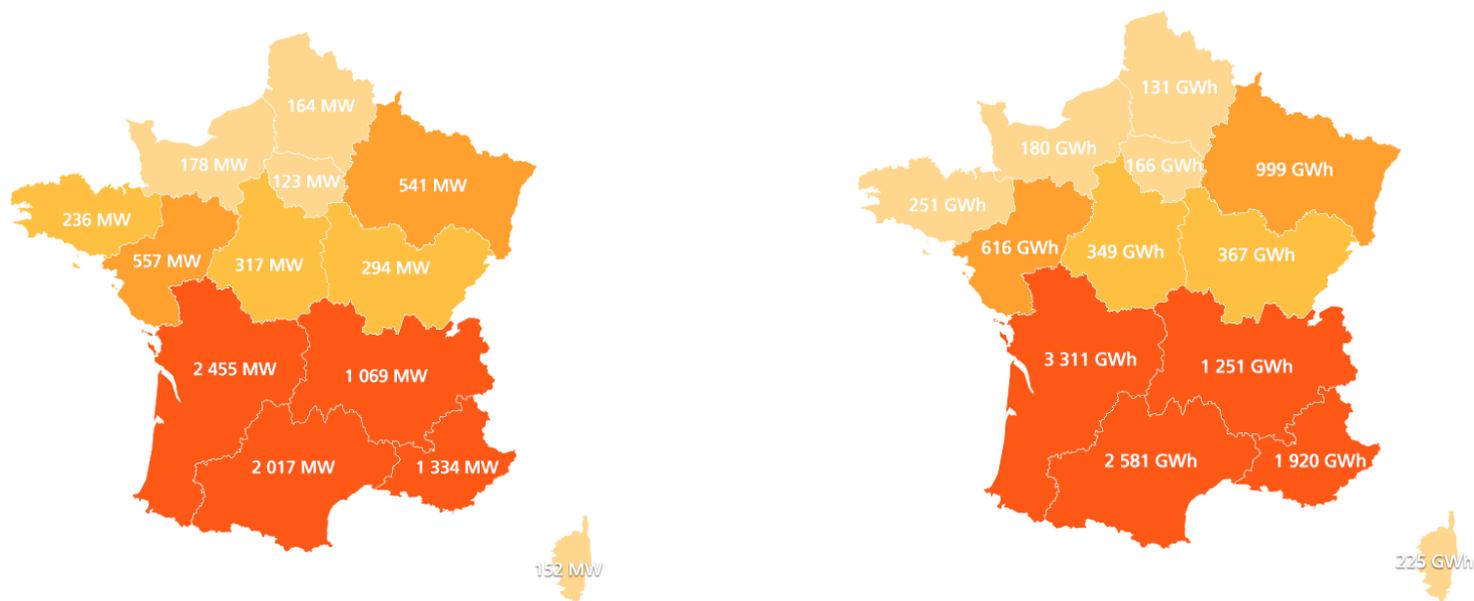


Figure 23 - Ensoleillement en France métropolitaine (kWh/m².j) (Source : Tecsol)

5.2.3.1. Potentiel régional du solaire photovoltaïque

D’après les données du RTE – bilan électrique 2019, les régions ayant la puissance raccordée et la production de solaire photovoltaïque les plus élevées sont situées dans le sud de la France. La Normandie présente des valeurs nettement plus faibles, toutefois l’ensoleillement de la région normande semble suffisant pour l’installation de panneau solaire photovoltaïque.



Solaire photovoltaïque : puissance raccordée par région en 2019

Source RTE - Bilan électrique 2019

Solaire photovoltaïque : production par région en 2019

Source RTE - Bilan électrique 2019

© EDF

© EDF

Figure 24 - Carte de la puissance raccordée par région en solaire photovoltaïque en 2019 (gauche) et de la production par région en 2019 (droite) (Source : EDF)

Le potentiel de panneaux solaires qui peut être installé dans la région dépend de la surface de toitures disponible pour recevoir la ressource. Plusieurs paramètres peuvent contraindre cette disponibilité :

- Le classement du bâtiment,
- Les encombrements (cheminée, lucarne...),
- Les ombrages internes (ombre de la cheminée...) et externes (arbre, bâtiment voisin...),
- L'orientation de la toiture : pour un pan de toiture orienté plein Est, l'ensoleillement annuel est 15 % moindre que pour une orientation plein Sud ; dans le cas d'une orientation Nord ou Ouest, la ressource reçue est considérée comme trop faible et cette surface n'est pas prise en compte.

De plus, la typologie des logements exerce une influence sur la faisabilité d'un projet photovoltaïque. Les projets aboutissent plus facilement dans le cas des maisons individuelles. En effet, dans le cas des copropriétés, l'acquisition d'un système de production photovoltaïque en toiture du bâtiment nécessite l'accord de l'ensemble des copropriétaires, et une entente sur la mutualisation des coûts d'investissement et d'entretien, ainsi que sur la gestion des installations.

5.2.3.2. Potentiel régional du solaire thermique

Les installations solaires thermiques ciblent souvent les maisons individuelles. Cependant, dans le cas de projet neuf, le solaire thermique collective peut s'avérer plus avantageux (mutualisation des coûts du réseau d'eau et de la maintenance).

Ainsi, sur le territoire de Caen La Mer, le potentiel principal, en volume, provient des maisons individuelles en zone à faible et moyenne densité urbaine. La cible privilégiée, en revanche, constitue les bâtiments collectifs en projet de construction.

5.2.4. Potentiel local

D'après les données de Météo France à la station Caen-Carpique, le temps d'ensoleillement annuel à Caen est de l'ordre de 1691,2 heures. La période la plus ensoleillée s'étend de mai à septembre.

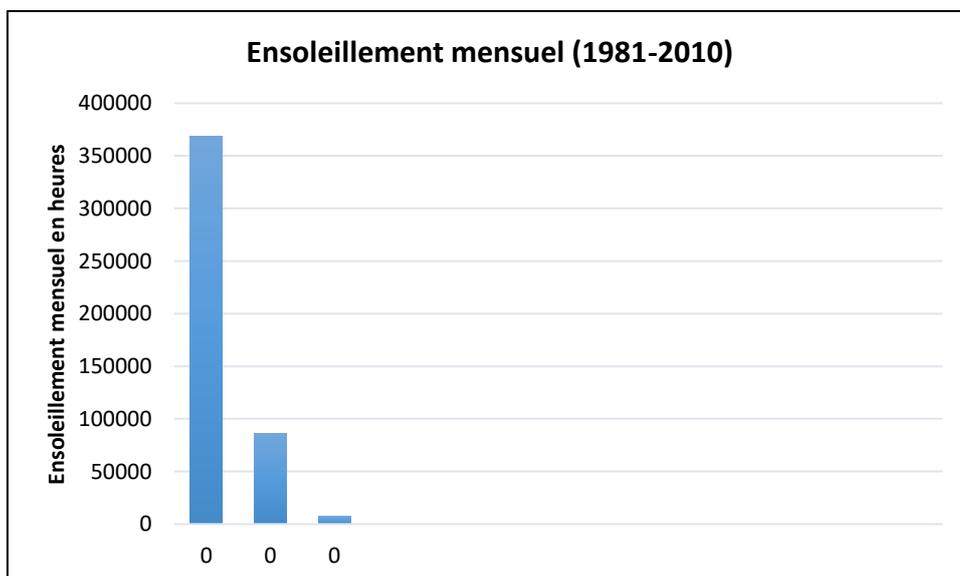


Figure 25 - Données d'ensoleillement moyennes mensuelles enregistrées à la station Caen-Carpique (1981-2010) (Source : Météo France)

Les variations d'azimut du soleil à Caen sont illustrées dans le graphique ci-après. L'angle optimal pour la pose de panneaux solaires à Caen varie selon la saison de 12° à 67° par rapport à l'horizontale. Sur l'année, il correspond à 36°.

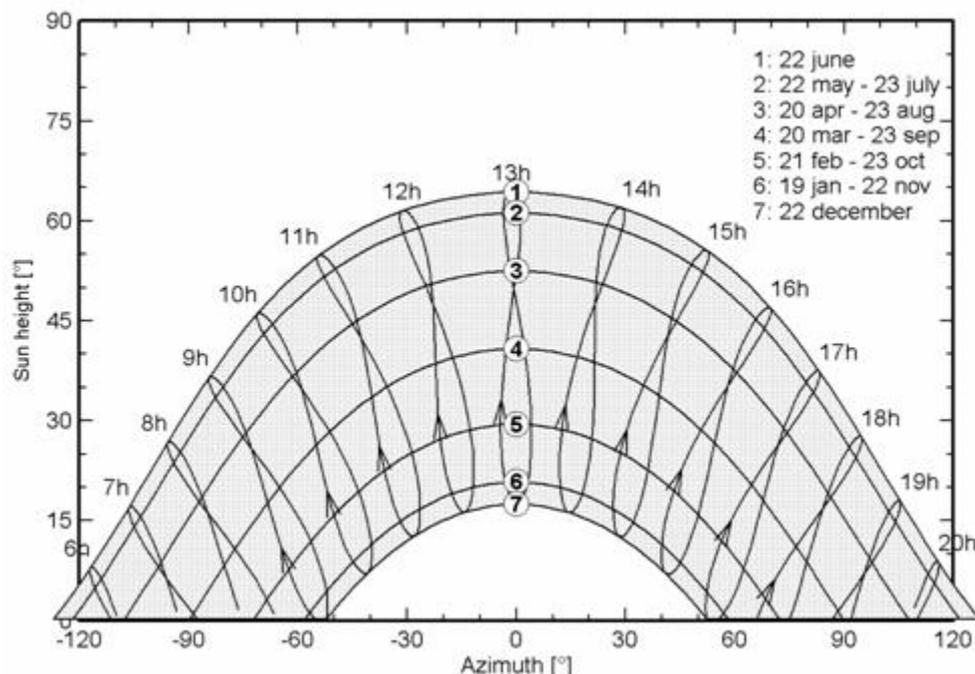


Figure 26 - Parcours du soleil à Caen, données Pléiades (Source : les 7 Vents du Cotentin)

Les données de potentiel ci-dessous constituent une référence fiable pour l'évaluation des gisements disponibles à Caen :

Tableau 5 - Données d'ensoleillements mensuels à Caen (Source : PVGIS)

Mois	Ensoleillement à l'horizontale (kWh/m2/jour)	Ensoleillement à l'angle optimal en kWh/m2/jour	Ensoleillement à la verticale (kWh/m2/jour)	Inclinaison optimale (°)
Janvier	859	1410	1440	65
Février	1570	2350	2210	59
Mars	2670	3400	2710	46
Avril	4130	4630	3020	32
Mai	4960	5000	2740	19
Juin	5460	5250	2650	12
Juillet	5520	5440	2840	16
Août	4670	5010	3040	28
Septembre	3350	4150	3110	43
Octobre	1950	2760	2460	55
Novembre	1100	1820	1850	64
Décembre	689	1160	1220	67
Total/an (kWh/m²)	1211,7	1392,3	963,9	36

Ainsi, le secteur d'étude bénéficie de bonnes conditions pour l'exploitation de la ressource solaire.

5.2.5. Aides au développement

Il existe plusieurs aides pour l'installation de panneaux solaires, parmi elles figurent les aides suivantes :

- Dans le plan solaire 2022, l'Etat a mis en place la prime à l'autoconsommation solaire. Elle est indexée sur la puissance d'installation (voir tableau) et varie entre 80 et 370 € par kiloWatt-crête. Elle est versée sur 5 ans par EDF Obligation d'Achat suite à la demande de raccordement Enedis. Pour pouvoir bénéficier de cette offre, il doit être fait appel à une entreprise disposant du label RGE (créé en 2011 par le ministère de la Transition Ecologique et solidaire) pour la réalisation des travaux. Certains critères techniques doivent également être respectés (installation parallèle à la toiture et sur toiture plate ou remplir une fonction d'allège, de bardage, de brise-soleil etc.)

Tableau 6 - Tableau récapitulatif du montant de la prime pour les panneaux solaires en autoconsommation actuellement en vigueur

Puissance de l'installation photovoltaïque	Montant d'aide versé pour chaque kWc installé
≤ 3 kWc	370 €
≤ 9 kWc	280 €
≤ 36 kWc	160 €
≤ 100 kWc	80 €

- La production d'eau chaude solaire thermique collective figure parmi les EnR ciblées par le Fonds Chaleur de l'ADEME qui distribue des aides à l'investissement dans des projets de production de chaleur renouvelable dans l'habitat collectif, le tertiaire, l'industrie, l'agriculture et les projets des collectivités. Le montant du Fonds Chaleur a été de 1,6 milliard d'euros pour la période 2009-2016.

Pour les opérations de solaire thermique collective non éligibles au Fonds Chaleur, l'ADEME et les Régions proposent des subventions dans le cadre des Contrats de Projet État Régions. L'ADEME cofinance également les études d'aide à la décision :

- Pour les pré-diagnostic solaires, l'ADEME fournit une aide allant de 50% pour un pré-diagnostic solaire simple à 70% si ce pré-diagnostic comporte un volet énergétique et thermique du bâtiment ;
- Pour les études de faisabilité, l'aide généralement versée par l'ADEME est de 50% sur une assiette de 75 000 €.

Les entreprises tertiaires peuvent aussi bénéficier d'une aide fiscale à l'investissement sous la forme d'un amortissement accéléré ou exceptionnel sur 12 mois.

- Un appel à projet pour des installations photovoltaïques exemplaires en autoconsommation uniquement est lancé par la région Normandie. La date limite de dépôt des dossiers est le 28 février 2022 néanmoins il est mentionné que cet appel à projet est destiné à se renouveler de manière récurrente. Il s'adresse à une multitude de bénéficiaire dont les maîtres d'ouvrage de l'habitat collectif (bailleurs, copropriétés, etc...) et de bâtiments tertiaires, les entreprises (TPE, PME, ETI et groupes) ne faisant pas partie du public éligible au dispositif Impulsion Environnement de l'Agence de Développement de Normandie. Le montant de la subvention s'élève à 25% de l'investissement total dans le cas où ce montant ne dépasse pas le plafond. Le plafond peut aller jusqu'à 50 000 € pour les projets individuels et 60 000 € pour les projets collectifs.

L'arrêté du 6 octobre 2021 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations implantées sur bâtiment, hangar ou ombrière utilisant l'énergie photovoltaïque [...] interdit désormais le cumul, pour une même installation, des primes et tarifs d'achat avec un autre soutien public

Rapport 115915/C – Mars 2023 41

financier à la production d'électricité, provenant d'un régime d'aides local, régional, national ou de l'Union Européenne.

5.2.6. Impact sur l'environnement

La production d'électricité photovoltaïque présente un bilan environnemental favorable. L'impact majeur est la dépense énergétique pendant la phase de fabrication, provenant à plus de 40% du raffinage du silicium. Etant donné qu'un système photovoltaïque est un générateur d'électricité, cet effet est plus que compensé par son utilisation.

Le solaire thermique n'a aucun impact direct sur l'environnement. Un chauffe-eau solaire n'entraîne ni émission polluante, ni formation de déchets dangereux, ni nuisances sonores. Seules de minimes contreparties paysagères peuvent leur être reprochées. Du point de vue des impacts indirects, il existe peu de données permettant d'avoir une idée précise. L'usage du solaire thermique est profitable du point de vue de l'environnement et notamment vis-à-vis de la réduction des GES. Le solaire thermique est en effet une énergie de substitution très performante pour des solutions de chauffage utilisant des combustibles fossiles. Il est modulable et adaptable pour des solutions collectives et individuelles, décentralisées ou non.

5.2.7. Exemples d'application

5.2.7.1. Solaire passif

Les surfaces vitrées sont les éléments clés pour permettre les apports solaires passifs. Les pare soleil optimisent ces apports dans les fenêtres et permettent d'en profiter l'hiver et d'éviter les surchauffes l'été.



Figure 27 - Illustration du principe du pare soleil

5.2.7.2. Solaire actif

5.2.7.2.1. Solaire photovoltaïque

Les applications solaires photovoltaïques présentent aujourd'hui des solutions économiques, techniques mais aussi esthétiques extrêmement variables. Les modules photovoltaïques intégrés aux bâtiments en vitrage, sur les murs, en toiture, ou en casquette deviennent des éléments de plus en plus prisés par les architectes, que ce soit en construction ou en rénovation. Le solaire photovoltaïque en solution d'éclairage urbain ou d'alimentation de systèmes électriques isolés (borne d'autoroute par exemple) est devenu commun.

- **Systèmes non intégrés :**



Figure 28 - Panneaux solaires sur châssis



Figure 29 - Panneaux solaires en surimposition

- **Systèmes intégrés :**



Figure 30 - Intégration de toiture



Figure 31 - Membrane d'étanchéité



Figure 32 - Bac métallique



Figure 33 - Brise soleil

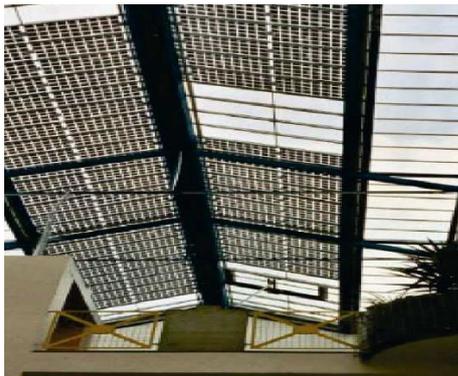


Figure 34 : Verrière



Figure 35 : Garde circo et allège

● Systemes intégrés au milieu urbain :



Figure 36 - Parking solaire



Figure 37 - Eclairage public solaire

5.2.7.2.2. Solaire thermique



Figure 38 - Chauffe-eau solaire collectif



Figure 39 – CESI

5.3. Bois – énergie

5.3.1. Principe

La filière bois-énergie représente l'ensemble des applications du bois en tant que combustible. Le bois est une énergie participant au développement durable pour des raisons :

- **Economique** : jusqu'à 6 fois moins cher que le fioul (voire gratuit dans certains cas),
- **Social** : 4 fois plus d'emploi que le fioul et le gaz naturel,
- **Environnemental** : neutre en CO₂, sa gestion permet l'entretien des espaces verts, des forêts et des haies champêtres.

Le bois-énergie et les autres combustibles solides représentent 31,8% du parc bioénergies en France en 2019 (la puissance totale raccordée en bioénergie en France étant égale à 2,1 GW en 2019), soit 0,67 GW de la puissance raccordée en bioénergie en France en 2019.

Le bois-énergie est considéré comme une énergie renouvelable, à condition que le stock prélevé chaque année soit reconstitué.

Le bois-énergie peut être, soit la finalité d'un processus de valorisation du bois, ou encore une source de valorisation secondaire d'un sous-produit appelé aussi produit connexe.

On distingue les usages suivants :

- **Le chauffage au bois individuel** : Le chauffage au bois ne se limite plus, aujourd'hui, à la cheminée traditionnelle mais regroupe de nombreuses solutions techniques (poêle, insert, cheminée, chaudière). Les appareils modernes au bois sont comparables en termes de confort de chauffage mais aussi d'entretien ou d'autonomie aux systèmes gaz, fioul et électriques, tout en cumulant les avantages d'une énergie propre et renouvelable.
- **Les chaudières collectives pouvant alimenter des réseaux de chaleur** : Sur le territoire de Caen la Mer, le développement le plus probable est la production de chaleur. Les chaudières collectives sont donc détaillées plus en détails ci-dessous.
- **Les centrales de cogénération chaleur électricité** : La production d'électricité à partir de biomasse n'est envisageable que dans le cas de production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération). La combustion de cette biomasse permet de dégager de la chaleur puis de produire de la vapeur. Cette vapeur a pour but d'alimenter dans un second temps soit des turbines vapeur soit des moteurs vapeurs pour la production d'électricité.
- **L'unité de gazéification** : Basée sur un procédé de dégradation incomplète de la biomasse sous l'action de divers agents oxydants tels que l'air, l'eau, cette installation est conduite de manière à privilégier la formation de gaz utilisables dans les moteurs ou les turbines.

Diverses filières peuvent être à même de proposer du bois-énergie pour l'approvisionnement de chaudières automatiques. Les ressources, nombreuses, peuvent être classées de la façon suivante :

- **Les ressources naturelles** issues de l'exploitation forestière, agricoles et de l'entretien du paysage (déchets humides) : Branchages, écorces, sciures, houppiers, souches.
- **Les ressources industrielles de première transformation** (scierie) – déchets humides – sciures, dosses, délignures, plaquettes, copeaux de bois humides, écorces.
- **Les ressources industrielles de deuxième transformation**, ameublement, menuiserie... – déchets secs – sciures, chute de bois, poussière de ponçage, copeaux de bois sec.

- **Les ressources déchets** : les bois de rebuts non souillés de catégorie A (palettes, cagettes, planches, bois de coffrage, caisse, cageot, traverses de chemin de fer, panneaux de particules, bois agglomérés, poteaux EDF).

Les chaudières automatiques à bois sont des générateurs de chaleur différents des chaudières à bûches traditionnelles, destinées aux particuliers. La figure ci-dessous représente les principaux éléments constitutifs d'une chaudière automatique à bois.

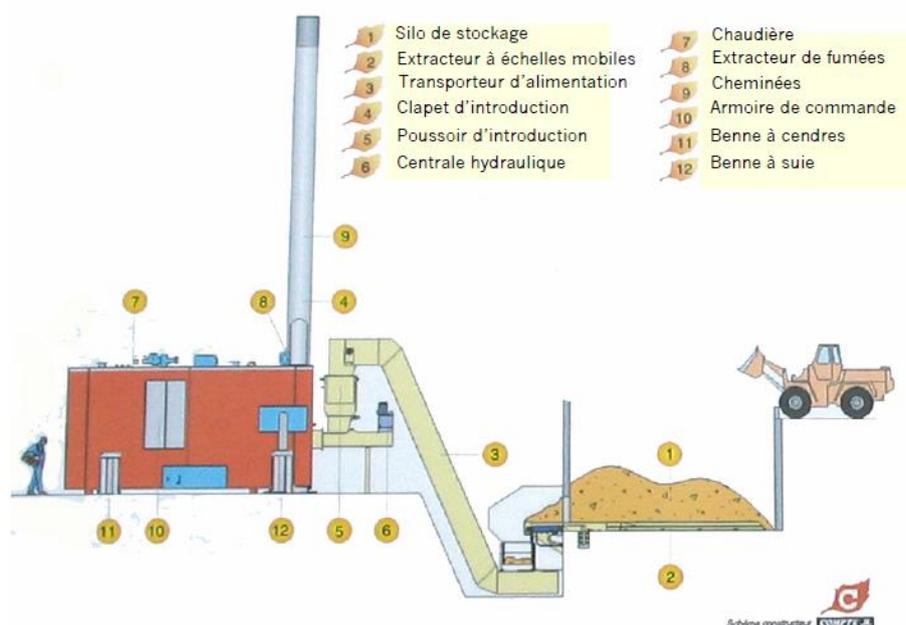


Figure 40 - Principaux éléments constitutifs d'une chaudière automatique à bois

Le combustible est envoyé automatiquement dans le foyer grâce à un système de convoyage (vis sans fin ou tapis), ce qui supprime complètement les manipulations quotidiennes de bois nécessaires avec une chaudière à bûches. La combustion est complètement maîtrisée grâce à la maîtrise des arrivées d'air, nécessaire à la combustion, et de la quantité de combustible envoyée dans le foyer. Le rendement atteint 80 % à 90 % ce qui a permis d'obtenir :

- Des températures de fumées très basses (110°C),
- Des cendres très fines produites en faibles quantités,
- Peu de dégagements de poussières et de produits de combustion incomplète dans les fumées.

L'un des points clés pour la réussite d'une installation de chaufferie bois est l'implantation du silo d'approvisionnement en bois. Il doit être facilement accessible pour des livraisons de combustible et être dimensionné pour assurer une autonomie suffisante en chauffage. Ainsi, la livraison du bois nécessite une réflexion en amont sur l'accès à la parcelle et les manœuvres réalisables sur le site (rayon de courbure pour les véhicules de livraison).

La figure suivante représente les principales caractéristiques d'une chaudière automatique selon sa taille :

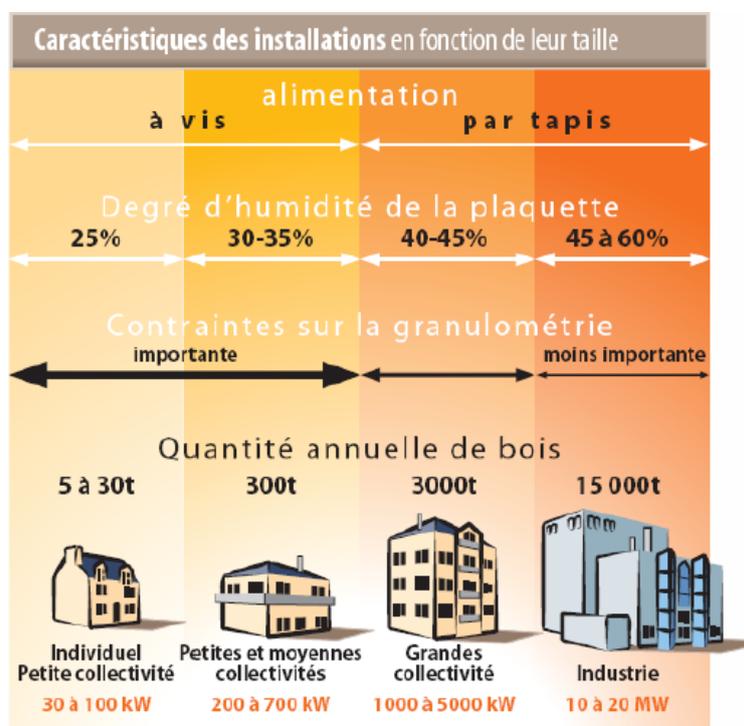


Figure 41 - Caractéristiques des installations de chaudières automatiques en fonction de leur taille (Source Association AILE)

Chiffres clés du bois-énergie (Ademe 2016) : En France, le coût total de production de la filière biomasse collective, avec ou sans réseau de chaleur, est estimé entre 62 €/MWh et 84 €/MWh pour les chaufferies de puissance supérieure à 3 MW, entre 73 €/MWh et 101 €/MWh pour celles ayant une puissance comprise entre 1 MW et 3 MW, et entre 88 €/MWh et 125 €/MWh pour les chaufferies de puissance inférieure à 1 MW

5.3.2. Aspects réglementaires

Les combustibles « classiques » suivants sont concernés par la rubrique 2910-A de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'environnement (ICPE) :

- Déchets de déchets végétaux agricoles et forestiers,
- Produits connexes de scierie et chutes de travail mécanique de bois brut,
- Déchets de biomasse sortis du statut de déchet (bois d'emballage),
- Produits composés d'une matière végétale agricole ou forestière,
- Etc.

Ainsi :

- Selon la rubrique 2910-A-1 : Toute installation de combustion, de combustibles précédemment cités, de puissance thermique nominale comprise entre **20 MW et 50 MW** est soumise à **enregistrement (E)** au lieu d'autorisation.
- Selon la rubrique 2910-A-2 : Toute installation de combustion de ces combustibles de puissance thermique nominale comprise entre **1 MW et 20 MW** est soumise à **déclaration avec contrôle (DC)**.

- Pour les installations de puissance thermique nominale **inférieure à 1 MW**, il n'existe pas de procédure de déclaration ou d'autorisation au titre de la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement.

Concernant les combustibles de la catégorie 2910-B1 (déchets végétaux secteurs IAA, déchets végétaux fibreux production pâte/papier, déchets de bois sans COH ou métaux lourds etc.) pour toute puissance thermique nominale comprise entre 1 MW et 50 MW, l'installation est soumise à enregistrement (E).

Pour les autres combustibles entrant dans la catégorie 2910-B2, lorsque la puissance de l'installation est comprise entre 0,1 MW et 50 MW celle-ci est soumise à autorisation (A).

D'autre part, tout bois ayant été, même très légèrement imprégné ou revêtu, comme les bois de rebut, est considéré comme un déchet. Dans ce cas, la combustion de déchets de bois traités, peints, collés, souillés ou ayant subi tout autre traitement est considérée comme de l'incinération de déchets.

5.3.3. Potentiel régional

Le bilan ressources/usages de l'ensemble de la filière bois a également été actualisé à l'échelle de la Normandie par biomasse Normandie : la ressource totale renouvelable, est de 5 836 kt/an (Première transformation du bois, bois forestier, bois bocager et urbain, bois en fin de vie et solde import/export), dont 56,2% sont valorisés, en bois d'œuvre et bois d'industrie (24 %) et en bois-énergie (76 %). Ainsi, la ressource annuelle encore disponible est de l'ordre de 2 555 kt/an soit 43,8% de la ressource disponible. Ce qui représente une part importante et constitue un atout dans la poursuite du développement de la filière bois-énergie en Normandie. Rappelons que le chauffage domestique représente une part importante des consommations de bois-énergie.

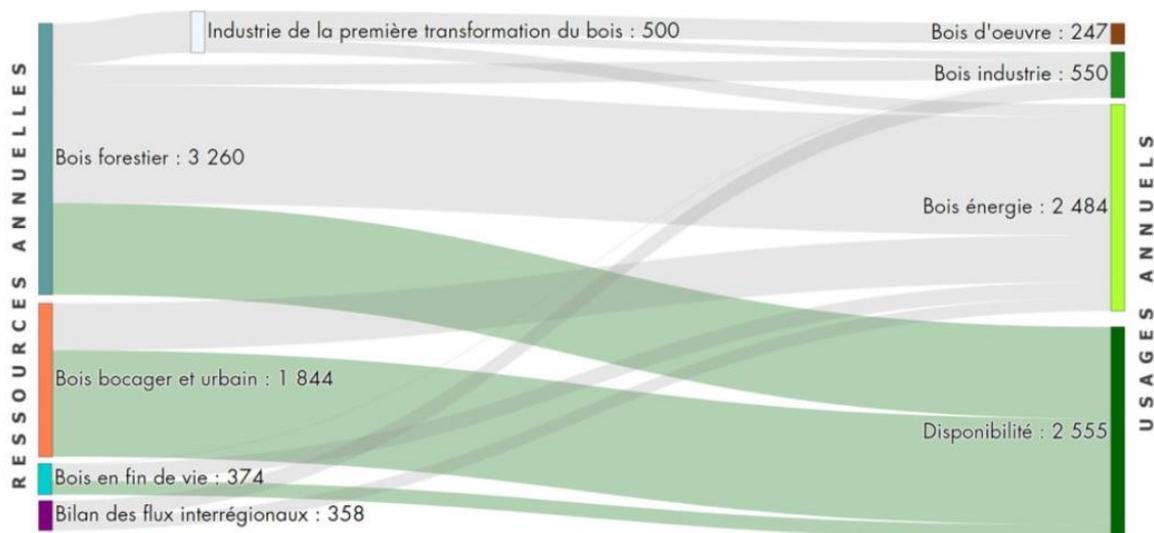


Figure 42 - Ressources et usages du bois en Normandie (milliers de tonnes) (Source : Biomasse Normandie)

Le développement en cours des chaufferies collectives alimentées par du bois-énergie constitue une cible à maintenir en s'appuyant sur les ressources en cours d'exploitation dans les régions normandes (voire à un échelon supérieur), et en favorisant voire en incitant à l'exploitation des ressources encore peu usitées (bocages, certains domaines forestiers privés).

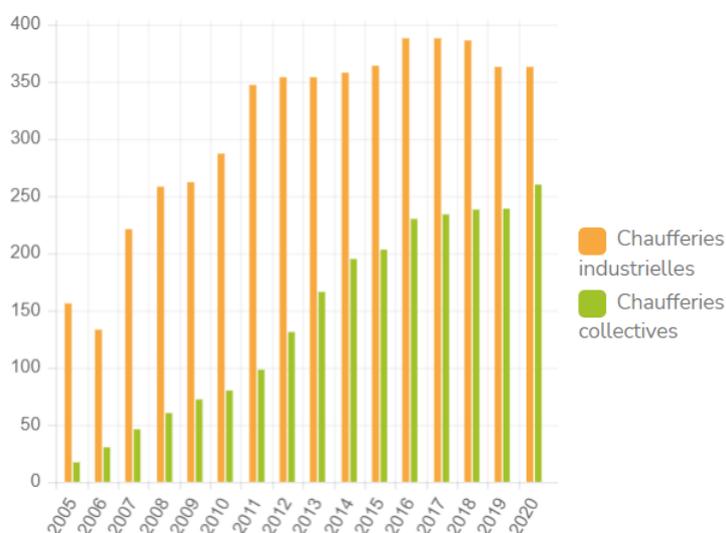


Figure 43 - Evolution de la puissance installée dans les chaufferies normandes (MW puissance installée) (Source : Biomasse Normandie)

5.3.4. Potentiel local

En s'appuyant sur les ressources en cours d'exploitation dans la région et en incitant à l'exploitation des ressources peu utilisés (bocages, etc.), le bois-énergie représente un potentiel de production pour Caen la Mer.

Ces capacités de production de chaleur issues de la biomasse, si elles sont confirmées, pourraient éventuellement être mutualisées en vue d'une contribution à la couverture des besoins du secteur.

D'après la cartographie des chaufferies bois collectives et industrielles en Normandie il existe différentes installations réalisées à proximité du projet :

Tableau 7 - Exemples de structures équipées de chaufferie bois collectives à proximité du projet d'aménagement (Source : Biomasse Normandie, 2021)

TYPE DE STRUCTURE	COMMUNE	PUISSANCE (kW)	Type de combustible
Groupe scolaire	AUDRIEU	150	Bois déchiqueté
Groupe scolaire intercommunal	MARTRAGNY	80	
Institut médico-éducatif	BAYEUX	55	
Quartier – Réseau de chaleur	BAYEUX (Quartier d'Argouges)	2 000	
Quartier – Réseau de chaleur	BAYEUX (Quartier de la Vallée des Prés)	3 200	
Salle omnisports	SAINT-MANVIEU-NORREY	220	

5.3.5. Aides au développement

L'installation de production de chaleur biomasse/bois peut être subventionnée par l'ADEME selon divers critères. Les installations doivent concerner le secteur collectif avec une production minimum

de 1200 MWh/an d'énergie biomasse sortie chaudière ou le secteur Entreprise (industriel, agricole et tertiaire) ayant une production de 1200 à 12000 MWh/an biomasse sortie chaudière.

Les installations inférieures à 1200 MWh/an peuvent être éligibles, uniquement dans le cadre des contrats de développement EnR territoriaux et patrimoniaux.

Comme pour la plupart des énergies renouvelables, l'ADEME subventionne le bois énergie que ce soit par les crédits d'impôts pour la transition énergétique, l'éco prêt à taux zero, etc.

5.3.6. Le bois-énergie et l'environnement

Le bois est une énergie que l'on peut qualifier de renouvelable. En effet, le bois est un combustible neutre vis à vis du CO₂ : la quantité de CO₂ émise lors de la combustion, du transport et de l'ensemble du processus de transformation est réabsorbée par les plantes (arbres ou arbustes) dans le cadre du cycle naturel du carbone.

Le caractère renouvelable et neutre du bois énergie est, toutefois, conditionné par la gestion raisonnée de la ressource. En effet, la seule capacité du bois à être régénéré ne permet pas de qualifier le bois énergie d'énergie renouvelable. Car, si le bois est dans l'absolu issu de plantes, et donc, susceptible d'être reproduit, sa capacité de régénération est, elle, dépendante des modes de gestion de la forêt, des haies, etc.

Comparativement aux énergies fossiles, le bois est également une source bien moindre de pollutions. Les progrès réalisés en matière de rendement de chaudières et de traitement des fumées (filtre à manche, électrofiltre) ont conduit à réduire les composés à risques à l'état de traces.

5.3.7. Exemples d'applications

Un projet de chaufferie bois peut être l'occasion de créer un réseau de chaleur desservant plusieurs bâtiments. Sa création présente certaines particularités :

- La centralisation de la production d'énergie (gain de place, d'exploitation et d'investissement sur le long terme),
- Le lissage des appels de puissance, permettant ainsi de raccorder des bâtiments peu ou plus intermittents, se complétant ainsi sur leurs besoins de chaleur tout au long de l'année.



Figure 44 : Chaufferie bois de Saint Hilaire du Harcouet (50) (Source : les 7 Vents du Cotentin)

5.4. Biogaz

5.4.1. Principes

Le biogaz est issu de la transformation par fermentation anaérobie de produits organiques non ligneux. La composition du biogaz est similaire à celle des gaz naturels bruts. C'est un mélange de méthane, de gaz carbonique, d'azote et de gaz traces. Selon la nature des déchets traités et les variations climatiques la composition du biogaz peut différer en proportion. On distingue le biogaz produit par les unités de méthanisation du biogaz récupéré sur des installations de stockage de déchets ultimes non dangereux. La méthanisation est le processus de formation d'un gaz à haute teneur en méthane à partir du biogaz.

L'ensemble des matières organiques fermentescibles est potentiellement valorisable énergétiquement à partir du biogaz qu'elles produisent. Les ressources peuvent être classées en quatre catégories :

- Les résidus de cultures, issues de l'agriculture,
- Les déjections animales, issues de l'agriculture d'élevage,
- Les déchets d'industries agroalimentaires,
- Les déchets des collectivités, issus des boues d'assainissement, des déchets des ménages...

La chaleur produite à partir de biogaz peut être utilisée de diverses manières. Les principaux usages sont présentés ci-dessous.

- **Production de chaleur et d'électricité**

La technique la plus simple pour la valorisation énergétique du biogaz consiste à utiliser celui-ci à des fins de production thermique à partir d'une chaufferie dédiée. Dans ce cas, la combustion du biogaz nécessite des brûleurs spéciaux alimentés avec une surpression supérieure ou égale à 300 mbar.

L'usage actuel le plus fréquent du biogaz consiste dans la production de chaleur et d'électricité par cogénération. Cette technique consiste à produire de l'électricité à partir d'un moteur et de récupérer la chaleur issue des pertes moteurs issues en majorité des gaz d'échappement.

Un des intérêts des moteurs est que leur taille permet une grande souplesse d'utilisation et de fonctionnement. Le problème principal de l'utilisation de moteurs est qu'ils doivent être robustes et selon la qualité du biogaz, ils peuvent nécessiter une étape de purification du combustible avant d'être brûlé (trop d'impuretés). Le biogaz doit comporter au moins 40 % de méthane.

La production d'électricité seule ou en cogénération peut également s'effectuer avec une chaudière au biogaz, suivie d'une turbine à vapeur. Cette voie très classique pose peu de problèmes techniques et les contraintes d'épuration du biogaz sont celles que réclament les chaudières.

- **La production de carburant**

La mise au point de techniques d'épuration adaptées au biogaz, validées dans le cadre d'opérations pilotes de démonstrations mises en place à Lille et Tours, ouvrent des perspectives de valorisation du biogaz en tant que carburant automobile.

Pour cette application, les spécifications de pureté du gaz sont beaucoup plus sévères que pour les précédentes, puisque le biogaz utilisable comme carburant doit contenir un minimum de 96% de méthane.

- **L'injection dans le réseau de gaz naturel**

Une autre forme de valorisation du biogaz peut consister dans l'exportation du méthane aux consommateurs. Dans ce cas, 2 solutions sont à explorer :

- L'injection dans le réseau de gaz naturel,
- L'injection du biogaz par canalisations dédiées.

La première solution nécessite, dans l'état actuel, des conditions très strictes quant à la nature du produit injecté. La composition finale du biogaz injectable ainsi que sa pression dépendent des spécifications imposées par le gestionnaire du réseau. Ces dernières portent principalement sur les teneurs en méthane, en gaz carbonique, en hydrogène sulfuré et en oxygène, avec des contraintes supplémentaires sur la teneur en composés organo-halogénés. Le gaz injecté doit en outre être odorisé avant l'injection.

La deuxième solution peut être mise en place plus facilement. Ce type de projet peut résoudre les problèmes de distances importantes entre le site de production et de consommation.

Chiffres clés du biogaz (ADEME 2016)

> En France, en considérant une valorisation économique de tous les MWh utiles (thermiques et électriques), le coût total de production de la filière méthanisation est estimé entre 96€/MWh et 130€/MWh pour les cogénérations à la ferme, et entre 95€/MWh et 167€/MWh pour les cogénérations centralisées.

5.4.2. Aspects réglementaires

Les combustibles « classiques » suivant sont concernés par la rubrique 2910-A de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'environnement (ICPE) :

- Biométhane,
- Biogaz provenant d'installations classées sous la rubrique 2781-1 – (anciennement sous rubrique 2910-C),
- Etc.

Ainsi :

- Selon la rubrique 2910-A-1 : Toute installation de combustion, des combustibles précédemment cités, de puissance thermique nominale comprise entre **20 MW et 50 MW** est soumise à **enregistrement (E)** au lieu d'autorisation.
- Selon la rubrique 2910-A-2 : Toute installation de combustion, des combustibles précédemment cités, de puissance thermique nominale comprise entre **1 MW et 20 MW** est soumise à **déclaration avec contrôle (DC)**.
- Pour les installations de puissance thermique nominale **inférieure à 1 MW**, il n'existe pas de procédure de déclaration ou d'autorisation au titre de la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement.

Concernant les combustibles de la catégorie 2910-B1 (notamment les biogaz issus d'installations 2781-2 et ISDND) pour toute puissance thermique nominale comprise entre 1 MW et 50 MW, l'installation est soumise à enregistrement (E).

Pour les autres combustibles entrant dans la catégorie 2910-B2, lorsque la puissance de l'installation est comprise entre 0,1 MW et 50 MW celle-ci est soumise à autorisation (A).

Le site de l'ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) propose une classification administrative des installations de méthanisation ainsi qu'un guide réglementaire et juridique.

D'après la rubrique ICPE 2781-1 pour la méthanisation traitant de la matière végétale brute, des effluents d'élevage, des matières stercoraires, lactosérum et déchets végétaux d'industries agroalimentaire :

- Lorsque la quantité de matières traitées est supérieure ou égale à 100 t/j, l'installation est soumise à autorisation,
- Lorsque la quantité de matières traitées est supérieure ou égale à 30 t/j et inférieure à 100 t/j, l'installation est soumise à enregistrement,
- Lorsque la quantité de matières traitées est inférieure à 30 t/j, l'installation est soumise à déclaration.

Pour la méthanisation d'autres déchets non dangereux (2781-2), l'installation est soumise à autorisation.

Les valeurs limites des gaz de combustion sont présentées dans le circulaire du 10 décembre 2003 relative aux installations classées : installations de combustion utilisant du biogaz.

L'investissement dans les installations de production d'électricité à partir de biogaz est soutenu par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE). Les installations sont alors rentabilisées par le tarif d'achat de la production. Les dispositions particulières relatives à la vente de biogaz sont énoncées aux articles L446-1 à L446-55 du code de l'énergie.

5.4.3. Potentiel régional

Le biogaz présente un potentiel énergétique très important en Normandie, notamment via la valorisation des déchets issus de l'agriculture. En septembre 2021 on dénombre 141 unités en fonctionnement sur le territoire normand dont la majorité sont attachées à une exploitation agricole.

D'après l'ORECAN, la production de biogaz est nulle sur le territoire de Caen la Mer. Néanmoins la consommation en biogaz devrait augmenter d'ici 2029 avec le développement de l'utilisation de bus alimenté par biogaz sur le territoire de Caen la Mer. La production de biogaz devrait ainsi être développée. Par exemple, un projet d'extension et de méthanisation des boues de la station d'épuration du Nouveau Monde est en cours sur la commune d'Hérouville-Saint-Clair située à l'est de Caen.

5.4.4. Potentiel local

Dans le secteur d'étude rapproché, il n'a pas été identifié d'installation pouvant être une source de biogaz. Le secteur d'étude est à domaine de grandes cultures moins génératrices de produits fermentescibles que l'élevage par exemple.

Les déchets ménagers de Caen-la-Mer sont dirigés vers sept déchetteries (Bretteville-l'Orgueilleuse, Bretteville-sur-Odon, Mouen, Colombelles, Fleury-sur-Orne, Hermanville-sur-mer et Ouistreham). Il n'existe pas à l'heure actuelle de projet de méthanisation des déchets de la collectivité.

La construction d'une unité de méthanisation à Biéville-Beuville était en cours de réalisation fin 2021. Cette commune est située à 13,9 km à l'est de la commune de Bretteville-l'Orgueilleuse (Thue-et-Mue). L'unité de méthanisation envisagée permettra de valoriser 25000 t/an de matières organiques soit 68,5 tonnes par jour.

5.4.5. Aides au développement

Il existe 2 grands dispositifs de soutien à l'investissement dans les filières de production de chaleur à partir de biogaz :

Le Fonds Chaleur de l'ADEME :

Ses crédits sont attribués dans le cadre d'appels à projets ou en dehors. Seules les installations de production de biogaz pour une valorisation sous forme de chaleur sont éligibles aux aides du Fonds Chaleur. Les appels à projets BCIAT (Biomasse chaleur industrie agriculture et tertiaire), dont le dernier est à échéance au 14/10/2021, concernent les grosses installations, dont la production énergétique est supérieure à 12 000 MWh/an. Le Fonds Chaleur attribue également des aides au cas par cas destinées à tout projet agricole ainsi qu'aux projets urbains de plus de 1 200 MWh/an.

Les Certificats d'économie d'énergie (CEE) :

Introduit par la loi sur l'énergie du 13 juillet 2005, ce dispositif des CEE est une mesure en faveur de l'efficacité énergétique. Il a pour objectif de réaliser des économies d'énergie dans les milieux diffus que sont les secteurs du bâtiment, des PMI et des exploitations agricoles. Le biogaz figure parmi les sources d'énergie éligibles pour l'obtention de CEE. Les CEE ne peuvent pas être cumulés avec les aides du Fonds Chaleur de l'ADEME.

L'ADEME peut également, dans le cadre de son Fonds Déchets, soutenir les investissements dans les installations de méthanisation à un taux de 30% de l'assiette éligible (limitée à 10 millions d'euros).

L'ADEME cofinance par ailleurs des études de faisabilité à hauteur de 50 à 70 % de leur coût.

5.4.6. Impacts sur l'environnement

Le méthane contenu dans le biogaz est un gaz à effet de serre, son captage permet ainsi d'éviter des émissions à l'atmosphère. La valorisation énergétique du biogaz permet également une substitution aux énergies fossiles.

Il est généralement admis que la plupart des agents pathogènes sont détruits lors de la méthanisation thermophile (à 55°C). L'hygiénisation dépendant du couple durée de séjour/température de réaction, il faut au besoin prévoir soit une pasteurisation du digestat à 70°C durant 2 heures, soit un compostage hygiénisant ou tout autre traitement hygiénisant.

5.4.7. Exemples d'application



**Figure 45 : Usine de méthanisation de Passel
(Source : Fertigaz)**



**Figure 46 : Usine de méthanisation du
SEVADEC (Source : Communauté
d'agglomération du Calaisis)**

5.5. Récupération de chaleur sur les eaux usées

5.5.1. Principe

La récupération de chaleur sur les réseaux d'eau usées nécessite la présence d'un réseau de taille suffisante pouvant garantir une quantité d'énergie suffisante et une régularité dans la production de chaleur. Ce type d'installation se conçoit généralement en amont des systèmes de traitement au niveau des plus gros collecteurs d'effluents. Un échangeur de chaleur va permettre de récupérer les calories existantes qui vont ensuite être utilisées pour alimenter une pompe à chaleur capable de remonter l'eau préchauffée à 58°C.

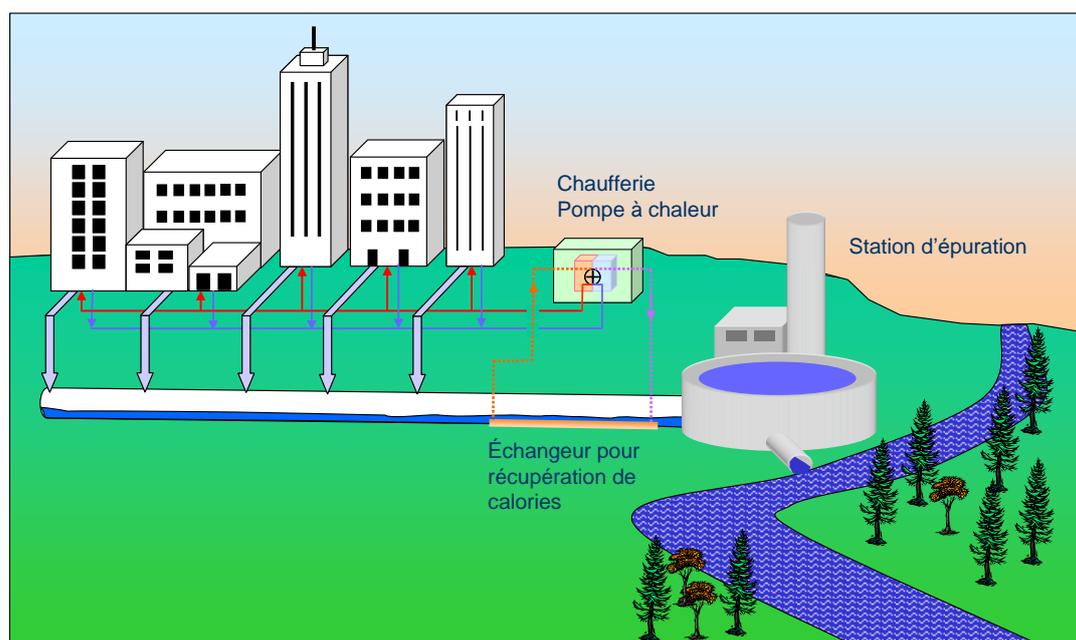


Figure 47 : Illustration d'un des principes possibles de récupération de chaleur sur eaux usées à grande échelle

5.5.2. Potentiel régional

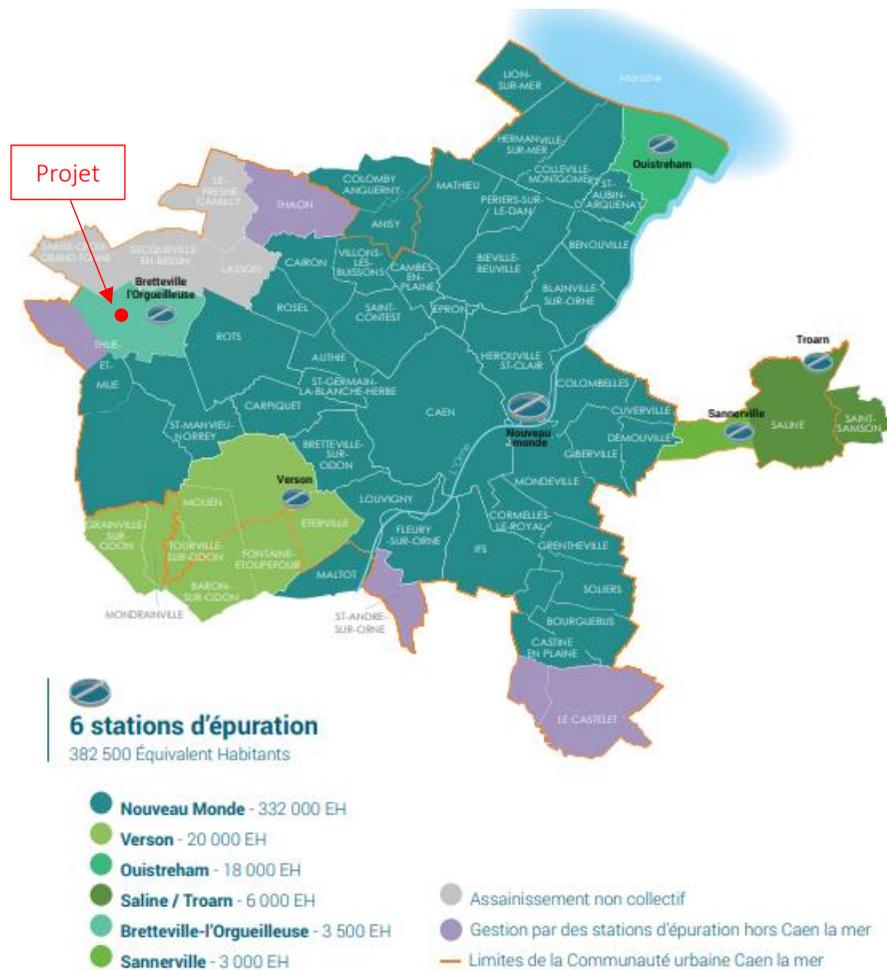


Figure 48 - Localisation des six stations d'épuration du territoire de Caen-la-Mer (Source : Communauté urbaine de Caen-la-Mer)

Six stations d'épuration sont présentes sur le territoire de Caen-la-Mer :

Tableau 8 – Stations d'épurations présentes sur le territoire de Caen-la-Mer (Source : Sispea)

Nom de l'ouvrage	Code Sandre	Capacité nominale Equivalents-Habitants	Commune d'implantation	Filière de traitement	Nom du milieu de rejet (type)
Station d'épuration de Bretteville	031409801000	3500	Thue-et-Mue	Boue activée aération prolongée (très faible charge)	CHIROMME (Eau douce de surface)
Station d'épuration de Ouistreham	031448801000	18000	Ouistreham	Boue activée faible charge	Canal de Caen à la mer (Estuaire (dont étang salé))
Station d'épuration de Sannerville	031466602000	3000	Troarn	Boue activée aération prolongée (très faible charge)	La Tonnelle (Eau douce de surface)
Station d'épuration de Verson	031473802000	20000	Verson	Boue activée faible charge	L'Odon (Eau douce de surface)
Station d'épuration de Saint-Aignan	031455401000	530	Le Castelet	Lagunage naturel	Infiltration (Sol)
Station du nouveau monde	031443702000	332000	Mondeville	Boue activée faible charge	L'Orne (Estuaire (dont étang salé))

5.5.3. Potentiel local

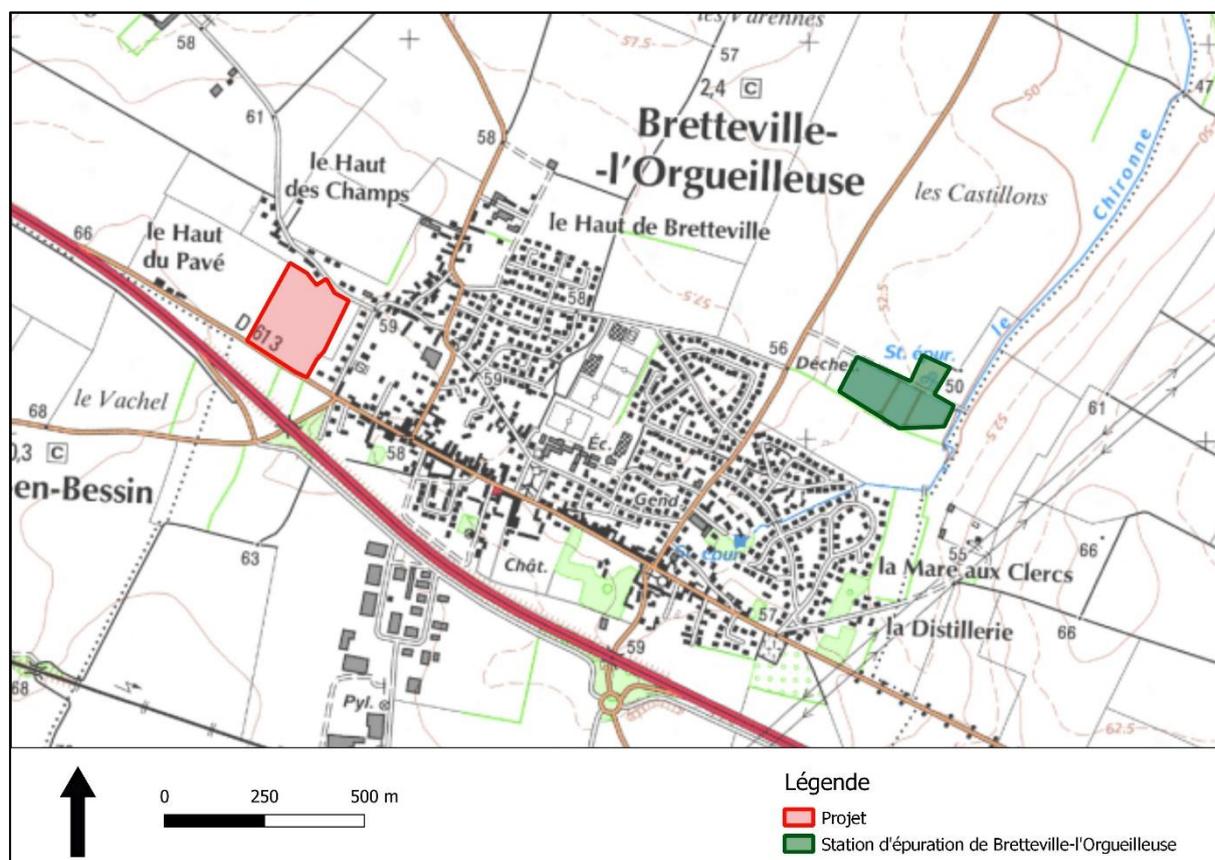


Figure 49 - Localisation de la station d'épuration de Bretteville-l'Orgueilleuse

La station d'épuration la plus proche du projet est celle de Bretteville-l'Orgueilleuse. Elle est située à environ 1,5 km à l'est du projet. Elle traite les effluents des communes historiques de Bretteville-l'Orgueilleuse et Putot-en-Bessin. D'après les données disponibles sur le Sispea (Observatoire national des services d'eau et d'assainissement), elle possède une capacité nominale égale à 3500 équivalents-habitants. Cette capacité nominale est 100 fois moins importante que celle de la station du nouveau monde, située sur la commune de Mondeville, où un projet de méthanisation des boues et de co-intrants est en cours d'étude. Le rejet de la station d'épuration se fait dans le cours d'eau situé à proximité, le Chiromme.

Un appel d'offre a été lancé en 2021 par la Communauté Urbaine de Caen la Mer pour des travaux de raccordement de la station d'épuration de Bretteville-l'Orgueilleuse à celle du Nouveau Monde et le renouvellement du réseau d'eau potable. La suppression de la station d'épuration de Bretteville-l'Orgueilleuse est prévue en 2022.

Il n'est donc pas recommandé d'utiliser cette source d'énergie dans le cadre du projet.

5.6. Géothermie

5.6.1. Principe

❖ Géothermie haute énergie

La géothermie « haute énergie » consiste à exploiter de la vapeur contenue dans des réservoirs géothermiques naturels, pour produire de l'électricité. Ce type de ressource est géographiquement très localisé. En particulier, en Guadeloupe, 8% de l'électricité de l'île est d'origine géothermique.

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

❖ Géothermie basse température

La géothermie basse température ou basse enthalpie consiste en l'extraction d'une eau à une température comprise entre 60°C et 85°C, à partir de gisements situés entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur. L'essentiel des réservoirs exploités se trouve dans les bassins sédimentaires comme le Bassin de Paris. L'exploitation de ce type de géothermie repose sur un fonctionnement en doublet :

- Un forage permet de puiser l'eau à grande profondeur, là où elle est naturellement très chaude,
- Ramenée à la surface du sol, par sa pression naturelle ou à l'aide d'une pompe, l'eau est envoyée par une canalisation étanche à une centrale géothermique,
- La production de chaleur a lieu dans la centrale géothermique, au moyen d'un échangeur de chaleur constitué d'une série de plaques en métal inoxydable (titane) assurant une grande surface d'échange. L'eau issue du sous-sol circule d'un côté, l'eau alimentant les installations de chauffage des immeubles circule de l'autre côté. Il n'y a aucun contact direct entre les deux eaux,
- L'eau provenant du sous-sol est renvoyée en profondeur après avoir cédé une part de sa chaleur,
- Un réseau de chaleur permet d'acheminer l'eau réchauffée après passage dans les échangeurs vers les divers immeubles clients.

En France, plus de 30 réseaux de chaleur urbains sont alimentés par géothermie profonde. En particulier en région parisienne, l'eau de l'aquifère profond du Dogger (Jurassique) est captée à environ 2 000 m de profondeur à une température comprise entre 60 et 80°C.

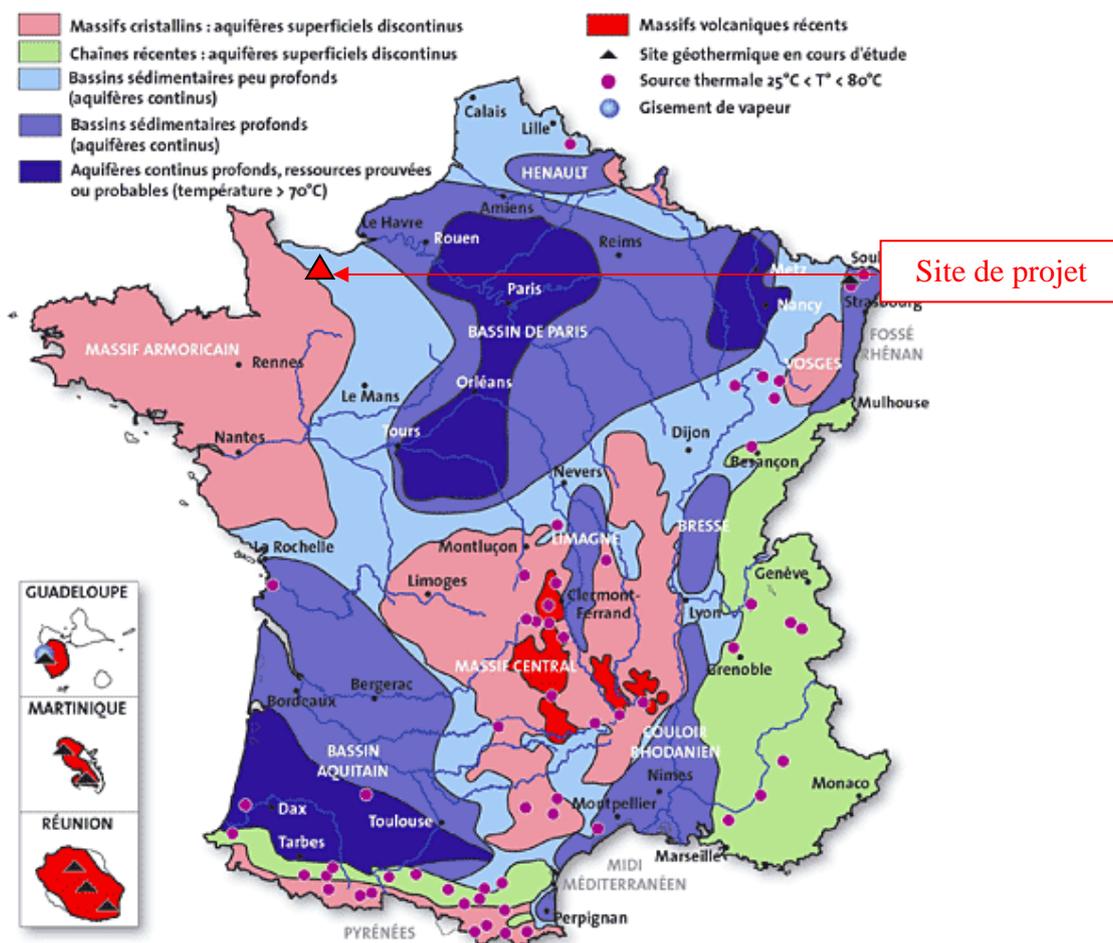


Figure 50 : les ressources géothermiques en France (source BRGM)

Dans le cas de Caen, la ville repose sur un bassin sédimentaire peu profond, qui abrite des aquifères continus. Les sources présentes sur cette zone jaillissent à une température inférieure à 30°. L'énergie potentielle issue des grandes profondeurs de la terre est limitée sur la zone.

❖ Géothermie très basse énergie

La géothermie « très basse énergie » concerne des formations aquifères peu profondes dont les eaux présentent une température inférieure à 30 °C, température qui peut être utilisée pour le chauffage en utilisant une pompe-à-chaaleur.

● Pompes-à-chaaleur géothermique sur eau de nappe

La pompe-à-chaaleur permet de prélever la chaleur à 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). Le schéma de principe de fonctionnement général d'une pompe-à-chaaleur sur eau de nappe est présenté ci-dessous :

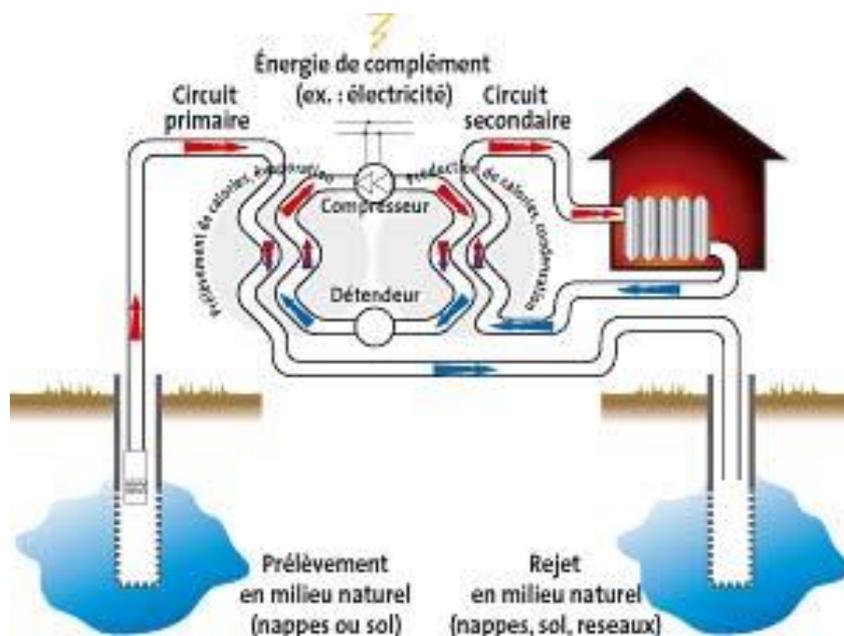


Figure 51 : Principe de fonctionnement général d'une pompe-à-chaleur sur eau de nappe

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.

Par inversion du cycle, certaines pompes-à-chaleur peuvent produire alternativement du chaud et du froid.

Le fonctionnement du compresseur de la pompe-à-chaleur nécessite une énergie de complément, l'électricité. La performance énergétique de l'installation, rapport entre la quantité de chaleur produite et l'énergie électrique consommée, est mesurée au travers du Coefficient de performance ou COP. L'eau souterraine étant à température constante au fil des saisons, le COP d'une pompe-à-chaleur est constant sur une année.

Les pompes-à-chaleur sont particulièrement efficaces avec des systèmes de chauffage à basse température comme les planchers chauffants. La géothermie « très basse énergie » est utilisée pour le chauffage/rafraîchissement et la production d'eau chaude sanitaire de maisons individuelles et de bâtiments intermédiaires (logements collectifs, bâtiments du secteur tertiaire).

- Sondes géothermiques

La géothermie « très basse énergie » peut également exploiter la chaleur du sous-sol par l'installation de capteurs peu profonds horizontaux (de 0,6 à 1,2 m) ou verticaux (environ 100 m de profondeur) faisant circuler un fluide caloporteur (souvent eau et antigel) en circuit fermé permettant d'échanger de l'énergie par transfert de chaleur puis de l'acheminer jusqu'à la PAC. Pour du chauffage la PAC transmet la chaleur puisée dans le sol vers le bâtiment à chauffer tandis que pour du refroidissement la chaleur provenant du bâtiment est injectée vers le sol.

Ces installations nécessitent l'utilisation d'une pompe-à-chaleur fonctionnant à l'électricité et dont la performance énergétique s'évalue par le COP.

Les capteurs géothermiques verticaux, descendant à une profondeur de 80-100 m (selon l'étude des sols préalables) nécessite la mise en place de nombreux forages et donc des coûts d'investissements plus élevés. L'absence de forage pour la mise en place de capteur géothermiques horizontaux (utilisation de la pelle mécanique) réduit le coût d'investissement. Les capteurs géothermiques horizontaux ne relèvent pas du code minier ni du cadre de la GMI (Géothermie de Minime Importance). Néanmoins leur installation nécessite une disponibilité foncière plus importante (entre à deux fois la surface à chauffer/refroidir selon le climat et l'isolation du bâtiment). Les performances globales sont également moins importantes que pour les échangeurs verticaux du fait de l'influence des variations saisonnières climatiques sur les échangeurs horizontaux étant donné leur faible profondeur.

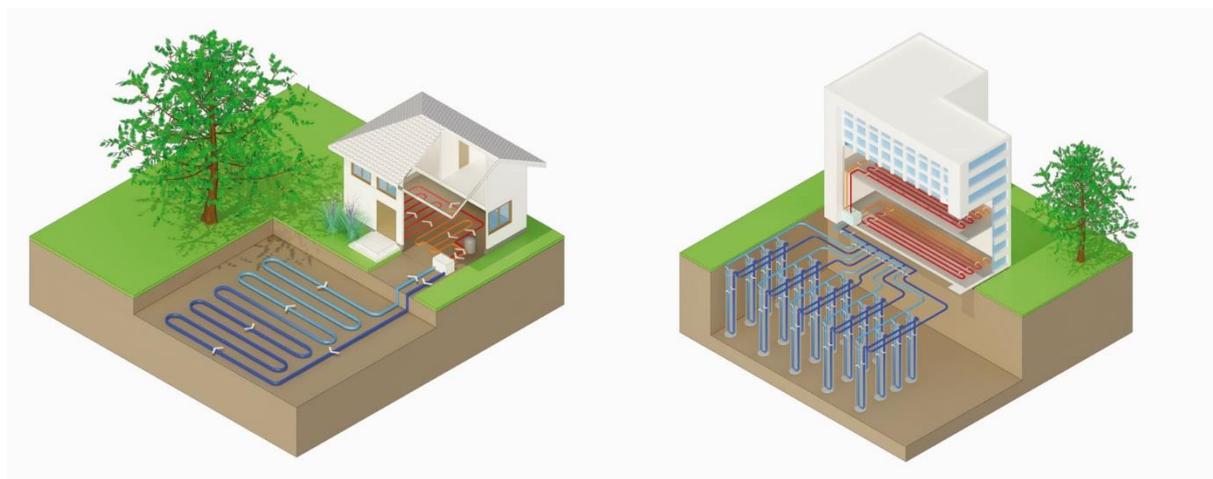


Figure 52 - Pompe à chaleur sur sondes géothermiques horizontales (à gauche) et pompe à chaleur sur sondes géothermiques verticales (à droite) (Sources : ADEME, BRGM)

- Pieux géothermiques

Dans le cas de construction de bâtiments nécessitant des pieux, il est possible d'utiliser ces structures de béton pour capter l'énergie thermique du sol. Les capteurs sont alors installés au cœur des fondations, d'où leur nom de pieux géothermiques.

Cette technologie est encore peu utilisée en France mais elle est très largement utilisée en Autriche, Allemagne, et Suisse depuis plus de 20 ans. Généralement les coûts d'équipement des pieux de structure des bâtiments sont relativement faibles par rapport au coût global du bâtiment. Dans le cas du projet il est peu probable que des pieux soient nécessaire.

Chiffres clés de la géothermie au niveau national (Ademe 2016) :

En France, le coût total de production des pompes à chaleur géothermiques est estimé entre 52 €/MWh et 129€/MWh pour la géothermie sur aquifère superficiel, et entre 70€/MWh et 135€/MWh pour la géothermie superficielle sur champs de sondes.

5.6.2. Aspects réglementaires

Pour les systèmes géothermiques avec échangeurs fermés dont la profondeur ne dépasse pas 10 mètres, aucune démarche de déclaration ou d'autorisation au titre du code minier n'est à réaliser.

Pour les systèmes géothermiques avec échangeurs ouverts aucune démarche de déclaration ou d'autorisation au titre du code minier n'est à réaliser à condition qu'aucun ouvrage de prélèvement

ou de réinjection ne dépasse la profondeur de 10 mètres et qu'au moins un des échangeurs fonctionne en circuit ouvert et répond aux critères de la GMI (Géothermie de Minime Importance).

Les installations en zone réglementaire verte et orange sont considérées comme relevant de la « géothermie de minime importance » (GMI) comme définie dans l'article L.112-2 du code minier et l'article 3 du décret n°78-498 du 28 mars 1978. Elles sont soumises à télédéclaration lorsque :

❖ **En boucle fermée :**

- La profondeur du forage se situe entre 10 et 200 m,
- La puissance thermique prélevée dans le sol est inférieure à 500 kW.

❖ **En boucle ouverte :**

- La profondeur du forage est inférieure à 200 m,
- La puissance thermique maximale échangée avec le sous-sol est inférieure à 500 kW,
- La température de l'eau prélevée est inférieure à 25°C,
- Les eaux sont prélevées et réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes prélevés et réinjectés est nulle,
- Les débits pompés prélevés doivent être inférieurs à 80 m³/h et 200 000 m³/an,
- Les variations de température de la nappe dans un rayon de 200 mètres doivent être inférieure à 4°C.

Pour ce type d'ouvrages, une télédéclaration est accessible sur le site Web géothermies-perspectives. Ainsi, cette télédéclaration suffit pour les forages géothermiques de minime importance : il n'est plus nécessaire de transmettre de déclarations par courrier à la DREAL et/ou à la mairie ou au service en charge de la police de l'eau.

En outre, il est nécessaire de vérifier auprès des autorités locales, mairie de la commune ou l'ARS du département, si la zone de forage ne se situe pas dans un périmètre de protection d'un prélèvement d'eau potable. De même, il est nécessaire de vérifier auprès de la DREAL si la zone de forage ne se situe pas dans un périmètre de protection du patrimoine.

Généralement, il est conseillé de réinjecter dans la nappe (en principe en aval de l'écoulement et à une distance minimale de l'ordre de 15 m). Le différentiel de température entre le prélèvement et le rejet ne doit pas dépasser 25°C. Lorsque le rejet est fait dans un réseau d'assainissement, deux cas sont possibles :

- Soit le réseau est séparatif (séparation des eaux usées et des eaux pluviales) : le rejet peut se faire dans le second avec une autorisation de la municipalité. La température de rejet ne doit pas dépasser 30 °C,
- Soit le réseau est unitaire : dans ce cas, le rejet est généralement interdit (s'il est autorisé, il y a des taxes).

5.6.3. Potentiel régional

Comme vu précédemment, il n'existe pas de contexte volcanique en région Basse-Normandie. Par conséquent, la production d'électricité par géothermie haute énergie n'est pas pertinente.

De même, la région repose sur un bassin sédimentaire peu profond, qui abrite des aquifères continus. Les sources présentes sur cette zone jaillissent à une température inférieure à 30°. Par conséquent, l'énergie potentielle issue des grandes profondeurs de la terre pour la géothermie basse énergie est limitée sur la région.

5.6.4. Potentiel local



Figure 53 - Éligibilité à la GMI (Source : Géothermies perspectives)

Le projet est situé en zone verte éligible à la géothermie de minime importance (GMI). D'après les données disponibles sur la BSS (Banque de données du sous-sol) un forage de 81 m de profondeur (BSS000HZKS) et un forage de 48 m de profondeur (BSS000HZKT) sont utilisés pour de la géothermie avec PAC (pompe à chaleur). Ils sont situés à une distance d'environ 350 m du projet. Des tests de pompage par paliers ont été réalisés et le débit d'exploitation retenu est de 2,70 m³/h. Les ouvrages ont été réalisés par l'entreprise Ouest Forage en 2009 (d'après les informations renseignées sur la BSS).

Les formations géologiques rencontrées au droit du site sont de haut en bas :

- **CE. Loess (Weichsélien) carbonaté ou non carbonaté** : il s'agit d'une formation éolienne d'une épaisseur moyenne de 1 à 2 m au droit du site (pouvant atteindre 5 à 6 m en dehors des zones de plateau),
- **j3Cr. Calcaires de Creully (Bathonien moyen)** : Constitués de calcaire bioclastique et oolitique de couleur jaune crème à litage oblique et cordon de silex.
- **j3Ca. Calcaires de Caen (Bathonien moyen)** : ils sont constitués de différents niveaux dont notamment les « bancs bleus » épais de 5 à 10 m et constitués par une alternance marno-calcaire (rarement observables), une dizaine de mètres de calcaire micritique homogène, argileux, pyriteux, micro détritiques déposés en gros bancs à stratification entrecroisée, 6 à 8 m de calcaire micritique crayeux à grain fin dans lequel on retrouve au milieu de la séquence le « banc royal » d'environ 1 m d'épaisseur.
- **j3PB. Marnes de Port-en-Bessin (Bathonien inférieur à moyen basal)** : la formation est constituée par des argiles et marnes sombres, compactes, massives de couleur grise à noire, alternant parfois avec des calcaires argileux en bancs plus clairs de 0,10 m à 0,50 m d'épaisseur.
- **j2CS. Calcaires à spongiaires (Bajocien supérieur)** : la formation est constituée d'un calcaire blanc, peu stratifié, riche en éponges siliceuses. Très carbonaté cet ensemble est fréquemment karstifié. En profondeur ce niveau carbonaté constitue un aquifère de type karstique.

Deux aquifères principaux sont rencontrés au droit du site : l'aquifère du Bathonien et l'aquifère du Bajocien. L'aquifère du Bathonien est un aquifère carbonaté libre de type discontinu comprenant plusieurs niveaux (Calcaire de Caen, Calcaire de Creully, Calcaire de Blainville, Calcaire de Ranville,

Calcaire de Langrune) séparés par des niveaux de caillasses. La transmissivité de l'aquifère varie de 10^{-1} à 10^{-2} m²/s tandis que le coefficient d'emmagasinement est compris entre 10^{-1} et 10^{-3} . Les débits d'exploitation des ouvrages AEP sont compris entre 50 et 350 m³/h (d'après la notice de la carte géologique Bayeux-Courseulles-sur-Mer).

L'aquifère du Bajocien, plus profond, est captif sous le Bathonien. Ces deux formations sont séparées par une couche imperméable argileuse du Bathonien inférieur : les Marnes de Port-en-Bessin. L'aquifère du bajocien est un aquifère carbonaté de type discontinu. Dans sa partie captive, cet aquifère est extrêmement hétérogène. Les données extraites de l'étude réalisée pour la « gestion des ressources en eau de l'aquifère captif du Bajocien » (BRGM, 1989,1994) indiquent des débits compris entre 12,5 et 52 m³/h.

Ainsi, la zone d'étude se situe sur les calcaires du Bajo-bathonien qui renferment une nappe aquifère pouvant être utilisée pour de la géothermie très basse énergie. La zone du projet est située sur un plateau, ce qui est généralement assez peu favorable à la production de quantité d'eaux importantes. Un débit de l'ordre de 10 m³/h est un ordre de grandeur des productions possibles. La géothermie sur nappe permet donc d'alimenter au mieux des petits ensembles collectifs de l'ordre de la dizaine de logements.

En ce qui concerne la géothermie sur sondes verticale, elle sera plutôt adaptée à des logements individuels, une sonde de 100 m de profondeur étant suffisante pour un logement d'environ 100 m².

5.6.5. Aides au développement

Dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, le Fonds Chaleur a été créé afin de développer la production de chaleur à partir des énergies renouvelables. Il est destiné à l'habitat collectif, aux collectivités et à toutes les entreprises. La gestion du fonds a été confiée à l'ADEME.

Son éligible toutes les opérations de géothermie de surface assistée par pompe à chaleur (PAC) ayant une production minimum de 25 MWh (production d'énergie géothermique entrée PAC) dans les secteurs de l'habitat collectif, tertiaire, agricole et industriel.

5.6.6. Impact sur l'environnement

L'utilisation d'échangeurs de chaleur n'a pas d'impact direct sur l'environnement.

Les pompes à chaleur utilisent de l'énergie conventionnelle pour pouvoir fonctionner, ce qui, rigoureusement, peut les exclure du champ des énergies renouvelables. Dans la majorité des cas, la quantité d'énergie utilisée pour produire l'électricité qui alimente la pompe à chaleur correspond à la quantité d'énergie fournie en sortie de pompe. Le bilan environnemental de la chaleur produite correspond alors à celui de l'électricité utilisée pour alimenter la pompe. Cette approximation est à pondérer en fonction des performances de la pompe à chaleur et de ses conditions d'utilisation.

Les fluides frigorigènes utilisés dans certains types de pompe appauvrissent la couche d'ozone. Ils sont par ailleurs de très puissants gaz à effet de serre. Pour éviter les dégazages dans l'atmosphère et les fuites, l'amélioration du confinement des installations associé à un contrôle périodique permet de limiter ces risques.

6. Analyse des opportunités et orientations possibles

L'estimation des besoins énergétiques, basée sur les informations transmises par AMENAGEO, montre que l'enjeu pour ces secteurs, porte principalement sur la couverture des besoins de chaleur et d'électricité. Les besoins de froid, relativement modestes voir nuls, pourront faire l'objet d'un traitement local, sans nécessairement requérir à des infrastructures spécifiques.

6.1. Besoins thermiques

Les besoins de chauffage seront tout d'abord à minimiser grâce au choix de principes constructifs adaptés et par des conceptions bioclimatiques qui tirent le parti maximal des apports solaires passifs.

6.2. Besoins en électricité

La solution énergétique la plus adaptée pour participer à la couverture des besoins d'électricité du site semble être le solaire photovoltaïque. Il est proposé de consacrer les surfaces disponibles pour implanter des capteurs photovoltaïques, plutôt que des capteurs de solaire thermique compte tenu du fait que d'autres ressources EnR sont disponibles pour la production de chaleur notamment le bois énergie. Le micro-éolien ne pourra avoir qu'une contribution modeste qui pourrait toutefois venir compléter les autres solutions énergétiques disponibles. L'énergie hydraulique ne pourra pas être sollicitée. La géothermie peut s'envisager ponctuellement pour des petits ensembles collectifs ou de manière individuelle.

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable. Les incertitudes ou les réserves qui seraient mentionnées dans la prise en compte des résultats et dans les conclusions font partie intégrante du rapport.

En conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou d'une reproduction partielle de ce rapport et de ses annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'Antea Group ne sauraient engager la responsabilité de celui-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

Les résultats des prestations et des investigations s'appuient sur un échantillonnage ; ce dispositif ne permet pas de lever la totalité des aléas liés à l'hétérogénéité des milieux naturels ou artificiels étudiés. Par ailleurs, la prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par Antea Group ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

Antea Group s'est engagé à apporter tout le soin et la diligence nécessaire à l'exécution des prestations et s'est conformé aux usages de la profession. Antea Group conseille son Client avec pour objectif de l'éclairer au mieux. Cependant, le choix de la décision relève de la seule compétence de son Client.

Le Client autorise Antea Group à le nommer pour une référence scientifique ou commerciale. A défaut, Antea Group s'entendra avec le Client pour définir les modalités de l'usage commercial ou scientifique de la référence.

Ce rapport devient la propriété du Client après paiement intégral de la mission, son utilisation étant interdite jusqu'à ce paiement. A partir de ce moment, le Client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser, sous réserve de respecter les limites d'utilisation décrites ci-dessus.

Pour rappel, les conditions générales de vente ainsi que les informations de présentation d'Antea Group sont consultables sur : <https://WWW.anteagroup.fr/fr/annexes>