

# Rapport de projet :

## *Promouvoir les énergies renouvelables dans la commune de Saint-Aunès*

Master Energie Multi-Source, Autoconsommation, micro-Réseaux (EMSAR) et Gestion,  
Source, Stockage et Conversion de l'énergie (G2SCo)

Léa JEAN-THEODORE  
Tom DEYDIER

Axel TUNON  
Jules MILLET

14 septembre 2022 - 26 janvier 2023



### **Nom et adresse de la structure d'accueil :**

Forum Saint-Aunès, Centre associatif, 1 place de la Mairie, 34130 Saint-Aunès

**Tuteur entreprise :** Benoit GORCE

**Tuteur pédagogique :** Sara CAVALIERE

**Responsable pédagogique :** Julie DETER

**Responsable de la formation :** Gilles TAILLADES

# Résumé

Ce rapport est réalisé à la demande de l'association Forum Saint-Aunès dans le cadre de notre unité d'enseignement « Activité en entreprise » ; il est à destination des habitants de la commune qui seraient intéressés par la thématique des énergies renouvelables.

Il présente les aspects techniques des différentes sources d'énergie renouvelable et des technologies de stockage existantes ainsi que leurs faisabilités sur la commune.

Différentes études de cas pour la production d'électricité et de chaleur à partir de ces sources d'énergie renouvelable ont également été réalisées. Ces études traitent à la fois l'échelle individuelle mais aussi l'échelle collective. Différentes configurations y sont abordées, elles regroupent plusieurs aspects : le coût de l'installation, les économies réalisées et les retours sur investissement notamment. La fin du rapport aborde les différents dispositifs d'aide au financement qui existent pour encourager les particuliers à réaliser des travaux de rénovation énergétique, acheter du matériel performant ou investir dans les énergies renouvelables.

# Sommaire

<b><i>I. Les différentes sources d'énergies renouvelables .....</i></b>	<b><i>9</i></b>
A. L'éolien .....	9
B. Le solaire.....	13
C. La géothermie .....	22
D. La biomasse .....	35
<b><i>II. Les différents systèmes de stockage de l'énergie.....</i></b>	<b><i>49</i></b>
A. Technologies non envisageables.....	49
B. Technologies à surveiller.....	54
C. Technologies déjà pertinentes.....	67
<b><i>III. Étude de cas des besoins énergétiques .....</i></b>	<b><i>77</i></b>
A. Production d'électricité avec des sources renouvelables.....	77
B. Production de chaleur avec des sources renouvelables.....	96
<b><i>IV. Financement possible.....</i></b>	<b><i>116</i></b>
A. Les aides locales.....	116
B. Les aides nationales.....	117
C. Précisions sur quelques technologies importantes .....	120

# Tables des illustrations

## Figures :

Figure 1 : Les différents types d'éolienne .....	9
Figure 2 : Bruit d'une éolienne en fonction de la distance.....	10
Figure 3 : Schéma de fonctionnement d'un panneau solaire thermique [5].....	14
Figure 4 : Schéma de fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque [8].....	17
Figure 5 : Schéma de fonctionnement d'un panneau solaire hybride à air [11].....	19
Figure 6 : Schéma de fonctionnement d'un panneau solaire hybride à eau [11] .....	19
Figure 7 : Schéma de principe du captage sur nappe. (Source : AFPG) .....	23
Figure 8 : Schéma de principe du captage par SGV (à gauche) et schéma de principe du captage par CSGV (à droite) (Source : AFPG) .....	24
Figure 9 : Schéma de principe du captage horizontal (Source : AFPG) .....	24
Figure 10 : Schéma de principe d'un mur géothermique (Source : AFPG).....	25
Figure 11 : Cycle thermodynamique de la pompe à chaleur (Source : ADEME la géothermie) .....	26
Figure 12 : Schéma de fonctionnement d'une PAC Air/Air (Source : Quelleenergie.fr) .....	28
Figure 13 : Schéma de fonctionnement d'une PAC Air/Eau (Source : Quelleenergie.fr) .....	29
Figure 14 : Principe d'une installation de géothermie utilisant le geocooling (Source : AFPG) .....	30
Figure 15 : Principe d'une boucle d'eau tempérée géothermique .....	31
Figure 16 : Processus de gazéification .....	38
Figure 17 : Processus de pyrolyse .....	40
Figure 18 : Processus de méthanisation .....	42
Figure 19 : Schéma de principe de la méthanisation [26] .....	43
Figure 20 : Production de bioéthanol de deuxième génération [29] .....	45
Figure 21 : Principe de fonctionnement d'une centrale STEP.....	50
Figure 22 : Schéma du supercondensateur .....	52
Figure 23 : Schéma d'un stockage électromagnétique par supraconducteur.....	53
Figure 24 : Schéma d'une installation de stockage d'énergie par air comprimé .....	55
Figure 25 : Schéma d'un volant d'inertie.....	59
Figure 26 : Principe de fonctionnement d'un stockage à chaleur latente .....	61
Figure 27 : Principe du stockage de l'énergie par adsorption/désorption.....	63
Figure 28 : Principe de fonctionnement du stockage de l'énergie par voie chimique .....	64

Figure 29 : Processus de stockage de l'hydrogène.....	66
Figure 30 : Batterie Li-ion.....	68
Figure 31 : Principe de fonctionnement d'un stockage à chaleur sensible.....	74
Figure 32 : Carte des contraintes d'installation de parcs éoliens (zones <500m du parc bâti, zones <15 km de l'aéroport) sur le territoire des Pays de l'Or. ....	89

**Tableaux :**

Tableau 1 : Comparatif des coûts d'une installation géothermique suivant la technologie de captage (Source : ADEME).....	33
Tableau 2 : Émissions de CO <sub>2</sub> par kWh de chauffage produit (Source : ADEME).....	34
Tableau 3 : Consommation électrique moyenne des foyers français (Source : hellowatt.fr)..	77
Tableau 4 : Consommations électriques moyennes des foyers suivant les critères de l'étude	78
Tableau 5 : Tarif de rachat EDF selon la puissance installée [44].....	79
Tableau 6 : Dimensionnement des deux installations photovoltaïques.....	79
Tableau 7 : Temps de retour sur investissement des deux installations.....	79
Tableau 8 : Prix d'un abonnement d'électricité en France [46].....	80
Tableau 9 : Tarif de prime à l'autoconsommation [44].....	80
Tableau 10 : Paramètres techniques des 2 installations photovoltaïques.....	82
Tableau 11 : Coûts des différents types d'installation photovoltaïque [48].....	82
Tableau 12 : Temps de retour sur investissement des deux installations.....	82
Tableau 13 : Tarif d'achat de l'électricité .....	83
Tableau 14 : Paramètres techniques des 2 installations photovoltaïques.....	84
Tableau 15 : Dimensionnement des batteries en fonction de la consommation journalière [49] .....	84
Tableau 16 : Temps de retour sur investissement des deux installations.....	84
Tableau 17 : Prix d'un abonnement d'électricité en France [46].....	86
Tableau 18 : Énergie produite annuellement par les deux types d'éolienne .....	87
Tableau 19 : Temps de retour sur investissement pour l'éolienne de 1 et 5 kW.....	87
Tableau 20 : Tarif de rachat EDF selon la puissance installée [44].....	90
Tableau 21 : Dimensionnement selon la puissance installée .....	91
Tableau 22 : Temps de retour sur investissement des installations.....	91
Tableau 23 : Tarif de rachat et de prime à l'autoconsommation [44] .....	92
Tableau 24 : Paramètres techniques des installations .....	93

Tableau 25 : Temps de retour sur investissement des installations.....	94
Tableau 26 : Plafond des ressources pour déterminer la catégorie de revenus .....	97
Tableau 27 : Coûts et abonnements des différents types d'énergie .....	97
Tableau 28 : Puissance à installer dans les deux types d'habitation .....	98
Tableau 29 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une chaudière gaz-condensation [56][57][58][59] .....	99
Tableau 30 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une chaudière fioul [60][61] .....	100
Tableau 31 : Paramètres de l'étude liés à l'installation de convecteurs électriques [62][63]	100
Tableau 32 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'un poêle à granulés [64][65].....	101
Tableau 33 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'un poêle à bûche [66][67] .....	101
Tableau 34 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une pompe à chaleur géothermique (eau/eau) [66][67].....	102
Tableau 35 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'un système de captage par sondes géothermiques verticales [58] .....	102
Tableau 36 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'un système de captage par sondes géothermiques horizontaux [58].....	103
Tableau 37 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une pompe à chaleur air/eau [66][67] .....	103
Tableau 38 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une pompe à chaleur air/air [68][69] .....	104
Tableau 39 : Paramètres de l'étude liés à l'installation de chauffe-eau électrique, thermodynamique et de panneau solaire thermique [70][71][72] .....	104
Tableau 40 : Taux de couverture de chauffage et d'ECS pour les différents types de technologies.....	105
Tableau 41 : Catégories de revenus déterminées par le revenu fiscal de référence .....	118
Tableau 42 : Cumul des aides pour les technologies exploitant des sources renouvelables d'énergie.....	120
Tableau 43 : Tarifs (en centimes d'€ par kWh) de revente à EDF OA des kWh d'électricité produits par une installation photovoltaïque [82] .....	121
Tableau 44 : Montant de la prime à l'autoconsommation.....	121

## **Graphiques :**

Graphique 1 : Évolution du coût selon la puissance pour une PAC géothermique eau glycolée / eau .....	33
Graphique 2 : Comparaison des temps de retour sur investissement des installations 3 et 6 kWc .....	85
Graphique 3 : Comparaison des temps de retour sur investissement des installations .....	95
Graphique 4 : Étude comparative du remplacement d'une chaudière fioul .....	106
Graphique 5 : Étude comparative du remplacement d'une chaudière gaz-condensation.....	108
Graphique 6 : Étude comparative du remplacement de convecteurs électriques .....	109
Graphique 7 : Étude comparative du remplacement d'une chaudière gaz-condensation.....	110
Graphique 8 : Étude comparative du remplacement de convecteurs électriques .....	112
Graphique 9 : Étude comparative des technologies de production d'ECS.....	113
Graphique 10 : Comparaison des factures énergétiques pour les deux types de maison pour une PAC géothermique .....	114

# Introduction

Dans le cadre de notre UE « activité en entreprise », nous travaillons pour l'association du Forum Saint-Aunès. Cette association est implantée à Saint-Aunès, une commune d'environ 4000 habitants située à l'est de Montpellier.

L'objectif de l'association est de créer un espace de rencontres et d'échanges entre des personnes qui souhaitent améliorer la vie dans la commune. L'association nous a sollicité dans le but de promouvoir les énergies renouvelables sur le territoire de Saint-Aunès.

Notre projet a donc pour objectif de rédiger un document pour l'association qui pourra servir de guide à ses membres et aux habitants du village sur l'utilisation d'énergies renouvelables sur leur territoire. Nous traiterons ce sujet à la fois à l'échelle collective mais également à l'échelle individuelle. Cela permettra alors d'améliorer le niveau de connaissances des membres de l'association mais aussi des personnes qui souhaiteront consulter ce document qui sera en accès libre. Dans cette démarche, nous avons essayé de vulgariser notre propos autant que possible afin que ces connaissances soient accessibles au plus grand nombre.

Le deuxième angle de notre rapport est celui de « guide du consommateur ». En effet, nous avons essayé de donner un maximum d'éléments pour que les lecteurs puissent être sensibilisés au greenwashing et éviter d'être manipulés par le marketing qui entoure la production d'énergies renouvelables.

Pour ce projet, nous sommes encadrés par M. Benoît Gorce, vice-président de l'association et par Mme Sara Cavalière, tutrice pédagogique au sein de l'Université de Montpellier. M. Gorce a également fait appel à M. Fabien Dispa qui est membre de l'association et qui dispose déjà de connaissances sur l'énergie afin de profiter de ses atouts pour stimuler nos discussions autour du projet. Ce document est le résultat d'un travail qui a débuté en septembre et qui s'est terminé à la fin du mois de janvier.

Nous y abordons d'abord les différentes voies d'exploitation de sources renouvelables d'énergie ainsi que leurs faisabilités sur le territoire de la commune. Ensuite, nous traitons les méthodes de stockage de l'énergie. La partie suivante regroupe différentes études de cas visant à donner des repères aux habitants de Saint-Aunès afin de hiérarchiser les différentes solutions envisageables. Et enfin, nous présentons les différents dispositifs d'aide au financement qui existent pour encourager les travaux de rénovations ou d'améliorations énergétiques.

# I. Les différentes sources d'énergies renouvelables

Dans cette partie, l'objectif est de présenter les différentes technologies qui utilisent des sources renouvelables d'énergie. Quatre voies sont étudiées : l'éolien, le solaire, la géothermie et la biomasse. L'énergie hydraulique a été écartée d'office car il n'y a aucun potentiel sur la commune pour faire de l'hydroélectricité. Présenter ces différentes technologies permettra d'identifier ce qui est exploitable ou non par la commune de Saint-Aunès.

## A. L'éolien

Cette partie a pour but de présenter le fonctionnement, les avantages, les inconvénients, le coût, les normes, la fin de vie et la faisabilité sur la commune de la technologie éolienne.

### 1. Fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui font elles même tourner le générateur de l'éolienne. À son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité [1].

### 2. Types

Il existe deux types d'éolienne qui sont réparties en sous catégories en fonction de leur puissance :

Éolienne domestique	Éolienne industrielle
Puissance qui varie de 100 W à 20 kW sur un mât de 10 à 35 mètres	Puissance qui varie entre 1,8 et 3 MW sur un mât de 80 à 100 mètres

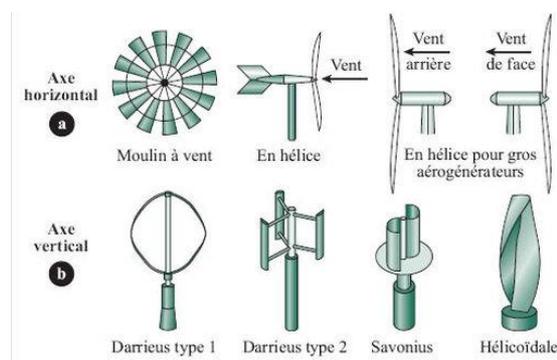


Figure 1 : Les différents types d'éolienne

Les éoliennes domestiques sont divisées en deux sous catégories : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal (Figure 1).

Dans les éoliennes domestiques, ce sont les éoliennes à axe horizontal qui sont les plus performantes.

### 3. Avantages et inconvénients

Les avantages sont nombreux. L'énergie éolienne est une énergie propre, renouvelable, qui ne produit aucun déchet et ne pollue pas à l'utilisation. On peut obtenir une production d'énergie régulière et continue si le parc éolien est situé dans un lieu adéquat et suffisamment exposé aux vents.

Néanmoins, il y a aussi des inconvénients non négligeables qu'il convient de citer : le coût des pales étant élevé, une longue période est donc nécessaire pour assurer le retour sur l'investissement.

Le vent est une énergie intermittente ce qui ne permet pas à l'éolienne de fonctionner tout le temps à plein régime.

Notons aussi que la présence des éoliennes sur les zones côtières (généralement les plus exposées au vent) peut être considérée comme une dégradation du paysage et que le bruit qu'elles produisent peut se révéler gênant (Figure 2).

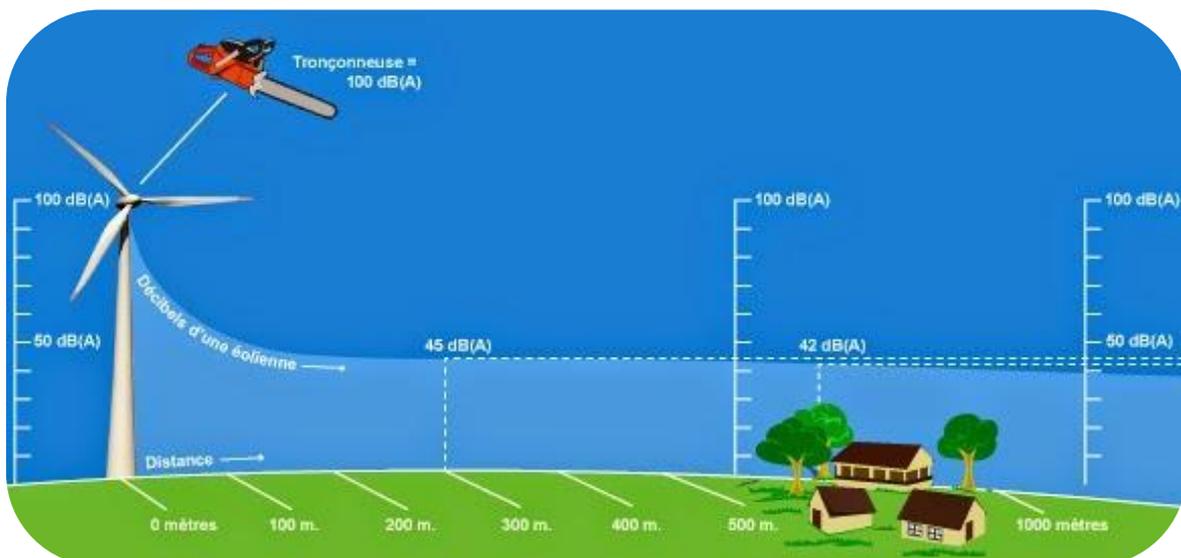


Figure 2 : Bruit d'une éolienne en fonction de la distance

#### 4. Coût, retour sur investissement et durée de vie

Le tableau ci-dessous présente le coût, le temps de retour sur investissement et la durée de vie des deux types d'éolienne. Bien évidemment, le coût dépend fortement de la puissance installée.

	Éolienne domestique	Éolienne industrielle
Coût	L'éolienne (72%), le raccordement au réseau (10%), le génie civil (7,5%), l'ingénierie (4%), les études préliminaires (1,5%), autres (4%)	
	Entre 10 000€ et 90 000€	Environ 1 400 000€
Temps de retour sur investissement	Entre 15 et 20 ans	Environ 10 ans
Durée de vie	Environ 20 ans	Entre 15 et 25 ans

#### 5. Normes et autorisations

Les tableaux ci-dessous reprennent les différentes normes et certifications à respecter lors de l'installation d'une éolienne [2].

Déclaration de travaux et permis de construire
<p><u>Éolienne inférieure à 12 m :</u> Une éolienne de moins de 12 m (hauteur du mât = distance entre le sol et le haut de la nacelle) peut être implantée sans autorisation préalable, ni permis de construire, sauf dans les sites classés ou en instance de classement, dans les sites patrimoniaux remarquables et dans les abords des monuments historiques (déclaration préalable obligatoire).</p> <p>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.</p> <p>Le propriétaire de petit éolien qui ne respecte pas les règles d'urbanisme encourt une amende d'au moins 1 200 €.</p> <p><u>Éolienne supérieure à 12 m :</u> L'installation d'une éolienne comprise entre 12 m inclus et 50 m est soumise à la délivrance d'un permis de construire.</p>

La personne intéressée doit déposer une demande en 4 exemplaires auprès de la mairie, quelle que soit la finalité de la production d'énergie (autoconsommation ou vente).

Les travaux doivent respecter les règles relatives à l'utilisation des sols, l'implantation, la destination, la nature, l'architecture, les dimensions, l'assainissement des constructions et l'aménagement de leurs abords.

#### Zones interdites

L'installation d'une éolienne domestique 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 est nécessaire de contacter la mairie pour toutes informations complémentaires.

#### Autorisation de défrichement

Si le terrain sur lequel l'éolienne va être installée avait une destination forestière, ce qui entraîne un changement d'affectation des sols, une autorisation de défrichement doit être obtenue.

#### Distance minimale par rapport à la limite de propriété

Sauf disposition spécifique du plan local d'urbanisme (PLU) ou du règlement municipal de constructions, la règle générale des constructions s'applique à l'implantation d'une éolienne de moins de 50 m : elle doit respecter une distance par rapport à la limite séparative du voisinage, égale à la moitié de sa hauteur, avec un minimum de 3 m.

Par exemple, une éolienne de 30 m de hauteur, pales comprises, doit être distante de 15 m de la limite parcellaire du terrain sur lequel elle est installée.

#### Raccordement au réseau électrique et obligation d'achat

##### Raccordement au réseau électrique :

Les petits éoliens peuvent être raccordés au réseau électrique public (rachat de l'énergie produite) ou alimenter directement le bâtiment (autoconsommation).

Pour électrifier un bâtiment non relié au réseau public de distribution, le propriétaire de l'éolien domestique doit effectuer une demande d'électrification auprès de la mairie.

Le propriétaire de l'éolienne peut revendre l'électricité en s'adressant à un fournisseur d'énergie dit RTE (Réseau de transport d'électricité).

#### Obligation d'achat :

A leur demande, les producteurs d'énergie éolienne terrestre bénéficient de l'obligation d'achat, sans condition d'implantation ni limite de puissance, par EDF et les entreprises locales de distribution si leurs installations de production sont raccordées aux réseaux publics de distribution.

Le surcoût occasionné pour ces acheteurs obligés est répercuté sur les clients finaux proportionnellement à leur consommation d'électricité qui paient la contribution au service public de l'électricité (CSPE).

#### 6. Fin de vie

Une éolienne est recyclable à 90%. Seules les pâles ne le sont pas (fibre de carbone et de verre et résine). Aujourd'hui, les pâles d'éolienne sont enterrées mais des solutions visant à séparer les différents éléments de la pôle sont en cours de développement.

#### 7. Faisabilité sur commune

L'installation doit de préférence faire l'objet d'une étude de faisabilité par un professionnel. Elle dépend de la topographie du terrain, qui doit être étendue et exposée à des vents réguliers suffisamment forts. La plupart des éoliennes démarrent avec des vents de 10 à 15 km/h.

## B. Le solaire

Les panneaux solaires sont considérés comme une des sources d'énergie les plus propres. C'est cet appareil placé au sol, sur les toits ou sur les ombrières qui utilise la lumière du soleil pour produire de l'énergie électrique ou de la chaleur (énergie thermique qui a pour but de réchauffer l'intérieur des bâtiments ou de fournir de l'eau chaude).

On note trois technologies utilisées :

- Les panneaux solaires thermiques qui convertissent la lumière en chaleur transformée en eau chaude ;
- Les panneaux solaires photovoltaïques qui convertissent directement la lumière en électricité solaire ;
- Les panneaux solaires hybrides qui convertissent à la fois la lumière en chaleur et en eau chaude (ou en air chaud) [3].

## 1. Panneau solaires thermiques

### a. Fonctionnement

Le panneau solaire thermique fonctionne selon un principe assez simple : un fluide caloporteur circule dans le panneau et absorbe la chaleur générée par le rayonnement du soleil. Ce fluide est ensuite envoyé vers le réservoir de stockage du chauffe-eau solaire où il transmet sa chaleur à l'eau sanitaire (Figure 3) [4].

Le chauffe-eau solaire est composé de plusieurs panneaux solaires thermiques (aussi appelés capteurs solaires), d'une pompe et d'un réservoir de stockage.

En général, le chauffe-eau solaire produit une partie (50 à 70 %) de l'eau chaude sanitaire. Le reste doit être produit par un système traditionnel, comme une chaudière mixte (chauffage et ECS) ou un ballon électrique (ECS uniquement).

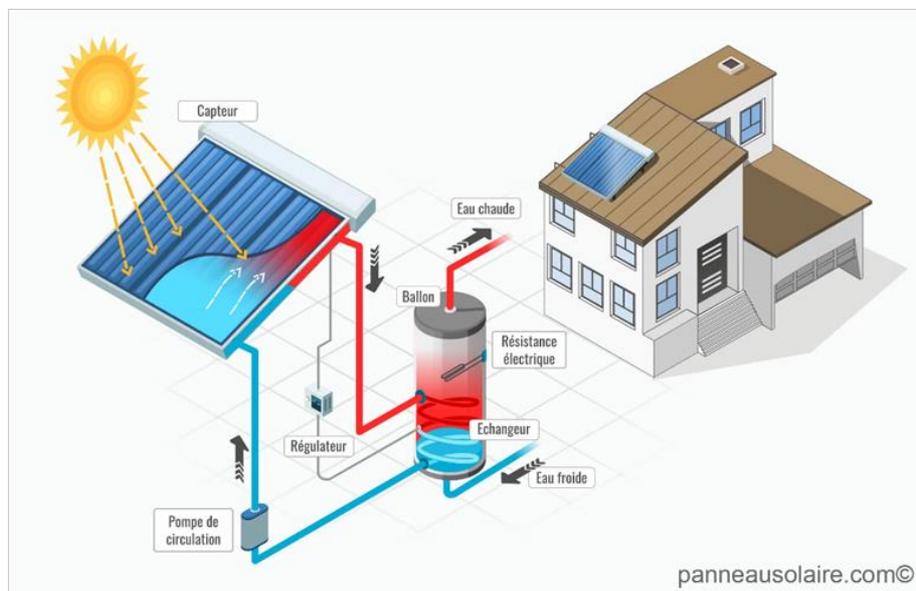


Figure 3 : Schéma de fonctionnement d'un panneau solaire thermique [5]

### b. Types

On distingue trois types de capteurs solaires : les capteurs plans opaques, les capteurs plans vitrés et les capteurs à tubes sous vide [4].

- **Capteurs plans opaques :**

Il s'agit des capteurs les plus simples. Ils sont composés de tuyaux opaques et foncés dans lesquels circule le fluide caloporteur. Ces tuyaux sont exposés au rayonnement solaire, et le fluide caloporteur absorbe directement la chaleur.

Il n'y a aucune isolation, ce qui signifie que le rendement est plutôt bas. L'avantage, c'est que les capteurs plans opaques sont très abordables.

- **Capteurs plans vitrés :**

Ces capteurs sont les plus courants. Ils sont pourvus d'une vitre, qui crée un effet de serre au-dessus de la plaque absorbante. Les tuyaux où circule le fluide caloporteur sont situés sous la plaque absorbante.

Ces capteurs sont également isolés, ce qui réduit les pertes de chaleur et augmente le rendement. De manière générale, les capteurs plans vitrés ont un bon rapport qualité-prix.

- **Capteurs à tubes sous vide :**

Comme son nom l'indique, ce type de capteur a la forme d'un tube. Dans chaque tube se trouve un absorbeur, qui capte le rayonnement solaire. L'absorbeur est relié à un tuyau où circule le fluide caloporteur.

Grâce au vide d'air, qui fait office d'isolant, ces capteurs ne sont pas fortement influencés par la température extérieure, et ils peuvent continuer à produire de la chaleur quand il fait froid. Ils ont donc un meilleur rendement, mais ce sont aussi les capteurs les plus coûteux.

- **Capteurs solaires thermiques à concentration :**

Ils font partie des modèles les plus performants. L'objectif de ces capteurs est de maximiser la chaleur transmise au fluide caloporteur. Pour ce faire, on place en plus un système de réflexion des rayons du soleil pour les concentrer sur l'absorbeur [4].

### c. Avantages et inconvénients

Avantages [6]	Inconvénients
<p>L'installation des panneaux solaires thermiques est facile et peut être faite sur tous les types de toiture.</p> <p>L'entretien est assez faible (une maintenance tous les 10 ans est nécessaire).</p> <p>L'énergie solaire est 100 % renouvelable et exploitable partout en France.</p>	<p>L'installation est relativement coûteuse.</p> <p>La technologie ne permet pas de produire de l'électricité.</p> <p>L'énergie produite est intermittente (elle ne fonctionne pas par temps couvert).</p>

#### d. Coût, retour sur investissement et durée de vie

Coût	Durée moyenne de vie	Durée moyenne de retour sur investissement
Le prix moyen de la pose au m <sup>2</sup> est entre 500 et 1000 €. Il n'y a aucun frais d'entretien en général, une maintenance est tout de même nécessaire tous les 10 ans	La durée de vie moyenne de cette technologie est comprise entre 10 et 15 ans	La durée moyenne de retour sur investissement pour cette technologie est comprise entre 5 et 10 ans selon la surface installée

## 2. Panneaux solaires photovoltaïques

### a. Fonctionnement

Les étapes qui permettent de produire de l'électricité avec un panneau solaire photovoltaïque sont [7]:

- Les photons viennent frapper les cellules photovoltaïques
- Les électrons se déplacent alors produisant un courant électrique continu
- Ce courant électrique continu est transformé en courant alternatif grâce aux onduleurs

Le principal composant d'un panneau solaire photovoltaïque est un module qui permet de transformer l'énergie du soleil en électricité. Ce procédé est rendu possible par les cellules photovoltaïques qui composent le module. Chaque cellule est produite à l'aide d'un matériau semi-conducteur appelé le silicium. Ce matériau a un comportement assez spécifique lorsqu'il est exposé au rayonnement solaire.

En effet, la lumière du soleil se compose de photons qui vont venir frapper la surface du panneau solaire photovoltaïque. Ils vont ensuite transmettre l'énergie qu'ils comportent aux électrons du matériau semi-conducteur, c'est-à-dire le silicium. Les électrons vont alors se mettre en mouvement et ce déplacement produit un courant électrique continu.

Le système permet ensuite d'additionner les quantités d'électricité produite par les différentes cellules qui composent le panneau solaire photovoltaïque. Ce courant créé est continu et sera transformé en courant alternatif grâce à un onduleur, puis transporté vers le panneau électrique pour, soit être revendu en totalité, soit partiellement revendu ou pour être utilisé en autoconsommation (Figure 4).

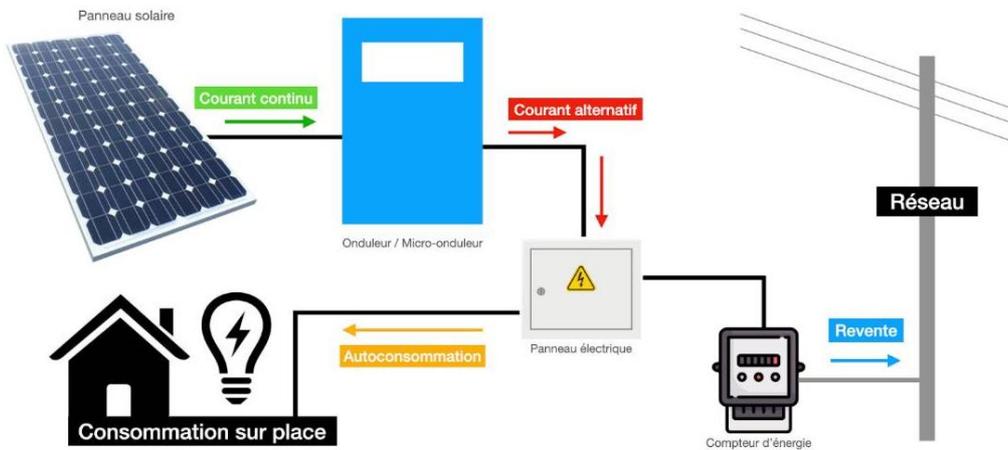


Figure 4 : Schéma de fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque [8]

## b. Types

- **Polycristallin**

Appelé également Poly-si ou poly silicium, il est constitué de plusieurs cristaux de silicium de tailles et de formes variées. Les cristaux sont orientés différemment, comme des éventails qui pointent vers l'extérieur. Il est surtout efficace pour capter la lumière ambiante et est adapté aux régions à climat chaud. Son rendement moyen est de 12% [9].

- **Monocristallin**

Il s'agit de cellules formées par des cristaux qui sont orientés dans une seule direction. Il est efficace pour capter le rayonnement direct. Le panneau solaire monocristallin a un rendement moyen de 15% [9].

- **Silicium Amorphe**

Le silicium amorphe est un ensemble de cellules qui n'ont pas subies de cristallisation, contrairement au silicium des cellules cristallisées. Ses atomes sont donc dépourvus d'une réelle organisation, ce qui lui permet de capter plus facilement la lumière. Toutefois, l'absence d'organisation atomique rend le déplacement des charges plus difficile, ce qui abaisse le rendement. Les cellules de silicium amorphe sont formées par une jonction de trois couches : une couche dopée positivement, une couche dopée négativement et une couche non-dopée appelée intrinsèque. Les cellules de silicium amorphe ont un rendement assez bas par rapport aux cellules cristallines. En effet, leur rendement moyen est entre 6 et 8 % [9].

### c. Avantages et inconvénients

- **Avantages**

Cette technologie comporte plusieurs avantages [4]:

- L'installation des panneaux solaires photovoltaïques est facile et peut être faite sur tous les types de toiture
- La possibilité de revendre tout ou une partie de l'électricité produite
- L'énergie solaire est 100 % renouvelable et exploitable partout en France

- **Inconvénients**

Elle comporte également des inconvénients :

- L'installation est relativement coûteuse
- La nécessité d'avoir une surface importante pour assurer la rentabilité
- La production est intermittente (pas d'électricité la nuit)
- Rendement qui diminue avec le vieillissement des cellules
- Rendement qui baisse quand la température augmente

### d. Coût, retour sur investissement et durée de vie

- **Coût**

- Le prix moyen de la pose au m<sup>2</sup> est de 1000 €.
- Il y a cependant des frais d'entretien qui sont à prévoir. Pour le remplacement de l'onduleur, ces frais s'élèvent de 1000 à 2000 € tous les 10 ans [4].

- **Durée de vie moyenne**

La durée de vie moyenne de cette technologie est comprise entre 20 à 25 ans voire 40 ans, si l'installation est particulièrement bien entretenue [4].

- **Durée moyenne de retour sur investissement**

Le temps moyen de retour sur investissement pour cette technologie est compris entre 10 et 15 ans selon la surface installée [4].

### 3. Panneaux solaires hybrides

#### a. Fonctionnement

Le panneau solaire hybride, aussi appelé mixte, est un système qui fonctionne à la fois avec des capteurs photovoltaïques (pour produire de l'électricité) et avec des capteurs thermiques (pour produire de la chaleur) [10].

Sur la face supérieure des panneaux, côté soleil, des cellules photovoltaïques produisent de l'électricité à partir des rayons solaires. Sur la face inférieure, des capteurs solaires thermiques captent la chaleur émise par le soleil. Grâce à un fluide caloporteur, ils la transportent jusqu'à un ballon de stockage.

Un panneau solaire hybride permet donc de produire à la fois de l'électricité (Figure 5) et de la chaleur (Figure 6).

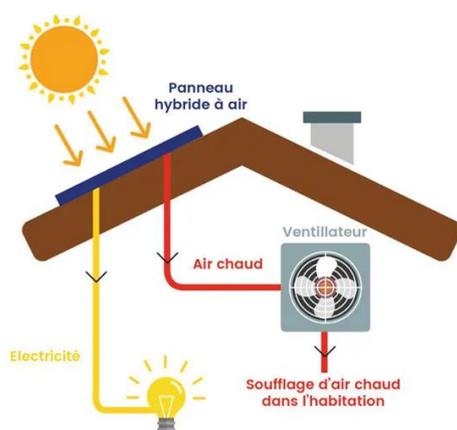


Figure 5 : Schéma de fonctionnement d'un panneau solaire hybride à air [11]

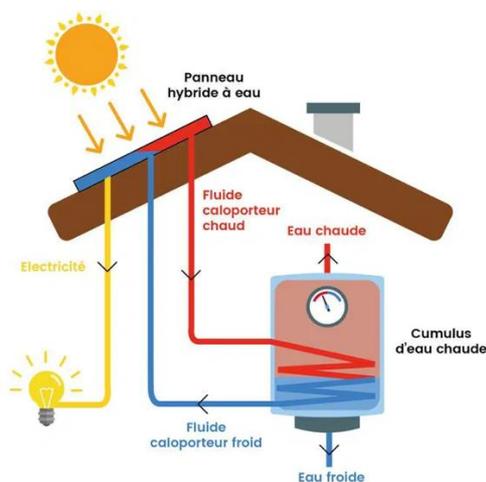


Figure 6 : Schéma de fonctionnement d'un panneau solaire hybride à eau [11]

## b. Types

- **Les panneaux solaires hybrides à air [10]**

Avec cette technologie, un dispositif de ventilation est installé à l'arrière de vos panneaux photovoltaïques. Il permet de récupérer l'air chaud, puis de le diffuser à l'intérieur de votre habitation ou d'un ballon thermodynamique [11].

La chaleur produite naturellement sous vos panneaux est donc utilisée pour chauffer votre logement. Cette technologie a l'avantage d'aérer vos panneaux photovoltaïques et donc de faire baisser leur température. En effet, ceux-ci sont moins efficaces lorsqu'ils sont soumis à une chaleur trop importante.

- **Les panneaux solaires hybrides à eau**

Avec un fonctionnement similaire, certains panneaux mixtes utilisent l'eau à la place de l'air pour produire de la chaleur. Cela crée donc de l'eau chaude sanitaire, que vous pouvez utiliser dans votre logement. Si vous êtes équipés de radiateurs à eau, vous pouvez également vous chauffer de cette façon. Un tel système permet également de refroidir efficacement les panneaux photovoltaïques, ce qui améliore leur rendement.

## c. Avantages et inconvénients

- **Avantages**

Cette technologie comporte plusieurs avantages [12]:

- L'installation des panneaux solaires hybrides a un meilleur rendement que les panneaux solaires photovoltaïques ;
- La possibilité d'avoir de l'électricité et de la chaleur ;
- L'énergie solaire est 100 % renouvelable et exploitable partout en France.

- **Inconvénients**

Elle comporte également des inconvénients [12]:

- L'installation est relativement coûteuse ;
- L'utilisation d'un chauffage est nécessaire car la chaleur produite n'est pas suffisante pour chauffer l'intérieur d'une pièce ;
- La technologie étant nouvelle, le temps d'attente pour s'en procurer est relativement long.

#### d. Coût, retour sur investissement et durée de vie

- **Coût**

Le prix moyen de la pose au m<sup>2</sup> est entre 1000 et 1500 €.

Il y a cependant des frais d'entretien qui sont à prévoir. Pour le remplacement de l'onduleur, ces frais s'élèvent à un montant entre 1000 et 2000 € tous les 10 ans [12].

- **Durée de vie moyenne**

La durée de vie moyenne de cette technologie est comprise entre 20 et 25 ans voire 40 ans, si l'installation est particulièrement bien entretenue [12].

- **Retour sur investissement**

Le temps moyen de retour sur investissement pour cette technologie est compris entre 7 et 10 ans selon la surface installée [12].

#### e. Fin de vie

Le recyclage des panneaux solaires photovoltaïques s'inscrit dans le prolongement de la logique écologique. La directive sur les déchets d'équipements électriques et électroniques dans l'UE oblige les fabricants de modules solaires à participer au recyclage de leurs produits en fin de vie (Source : Projet TER M1 EMSAR Recyclage des panneaux photovoltaïques)

C'est l'éco-organisme sans but lucratif PV Cycle France dit SOREN qui s'occupe du recyclage des panneaux solaires. Jusqu'en juin 2018, "les panneaux français étaient envoyés en Belgique ou en Allemagne, où ils étaient recyclés à 85%", indique Bertrand Lempkowicz, responsable communication chez PV Cycle, l'éco-organisme pour les panneaux photovoltaïques.

PV Cycle s'occupe ainsi de la collecte et du recyclage des panneaux solaires usagers. Mais l'éco-organisme a aussi pour but d'informer et de sensibiliser les professionnels et les particuliers sur la gestion des équipements usagés. L'organisme met à disposition différents points de collecte gratuits. Il s'agit d'un système agréé par les pouvoirs publics, financé par les acteurs du photovoltaïques (importateurs, distributeurs, fabricants et propriétaires de panneaux solaires), lesquels sont tous assujettis à une redevance spécifique.

#### 4. Faisabilité sur la commune

La modularité et l'adaptabilité de cette technologie font qu'elle est totalement envisageable sur Saint-Aunès. La question n'est alors qu'à résumer au nombre de panneaux à installer. Plus il y

aura de panneaux installés, plus il y aura de puissance installée. C'est une technologie particulièrement intéressante dans la région de Montpellier qui dispose d'un excellent taux d'ensoleillement. Cependant, l'utilisation des panneaux solaires hybrides n'est pas recommandée pour le moment. C'est une technologie assez nouvelle et l'investissement est conséquent mais elle est promise à un bel quand elle sera plus développée.

## C. La géothermie

La géothermie est l'utilisation de la chaleur naturelle de la terre en tant que source d'énergie. Cette énergie renouvelable, présente dans tous les sols, permet de produire de la chaleur et du rafraîchissement. Elle est notamment très faiblement émettrice de CO<sub>2</sub>, performante, durable, locale, non délocalisable, sans impact esthétique en surface, régulière et disponible 24h sur 24. La géothermie permet la valorisation de la chaleur fatale produite par la roche de la croûte terrestre (dégradation des éléments radioactifs) et le refroidissement du noyau terrestre qui dégage de la chaleur, avec l'exploitation d'une chaleur constante toute au long de l'année.

### 1. Types

On distingue deux types de géothermie :

- La géothermie de surface, captage de chaleur à une profondeur maximale de quelques centaines de mètres. La production de chaleur ou de froid est associée à une pompe à chaleur. Elle représente 75% de la puissance installée de la filière en France.
- La géothermie profonde, pouvant aller de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Elle exploite l'eau géothermale présente dans des nappes souterraines et les aquifères. Avec cette solution, la production d'électricité est également possible nécessitant néanmoins des conditions géologiques particulières.

Dans ce rapport seule la géothermie de surface sera détaillée, car c'est la seule solution qui apparaît comme réalisable sur la commune de Saint-Aunès.

### 2. Fonctionnement

Une installation de géothermie de surface est constituée de 3 éléments principaux :

- Un dispositif de captage : permet de capturer la chaleur présente dans le sol
- Un dispositif de production : il valorise l'énergie du sous-sol
- Un dispositif de régulation : il permet de gérer les différents modes de fonctionnement

### 3. Le dispositif de captage

En fonction des ressources disponibles sur le terrain, plusieurs dispositifs de captage sont possibles :

- **Le captage sur nappes**

Ce dispositif permet de capter la chaleur de l'eau en présence d'une nappe d'eau possédant un débit suffisant et situé à une profondeur raisonnable. Deux (ou trois) forages sont nécessaires pour la mise en œuvre de cette technique : un pour pomper l'eau à la surface, et un (ou deux) pour réinjecter l'eau en sous-sol (Figure 7).

Il s'agit d'un captage extrêmement modulable : selon les caractéristiques de la ressource, il peut alimenter une maison (aquifère superficiel) ou un quartier entier (aquifère profond pour alimenter une boucle d'eau tempérée) [13].



Figure 7 : Schéma de principe du captage sur nappe. (Source : AFPG)

- **Le captage par sondes géothermiques verticales (SGV)**

Une sonde géothermique verticale est constituée d'une boucle en ("tube en U"), dans laquelle circule en circuit fermé un fluide caloporteur (de l'eau glycolée), cette sonde est insérée dans un forage. La puissance extraite (ou puissance frigorifique) est de l'ordre de 50 W par mètre linéaire de forage. Il est possible d'installer plusieurs sondes afin d'augmenter la puissance installée, on parle alors de champ de sondes géothermiques verticales (CSGV). Les sondes géothermiques verticales sont déployables sur la quasi-totalité du territoire contrairement au captage sur nappe qui nécessite la présence d'une ressource d'eau souterraine (Figure 8)[13].

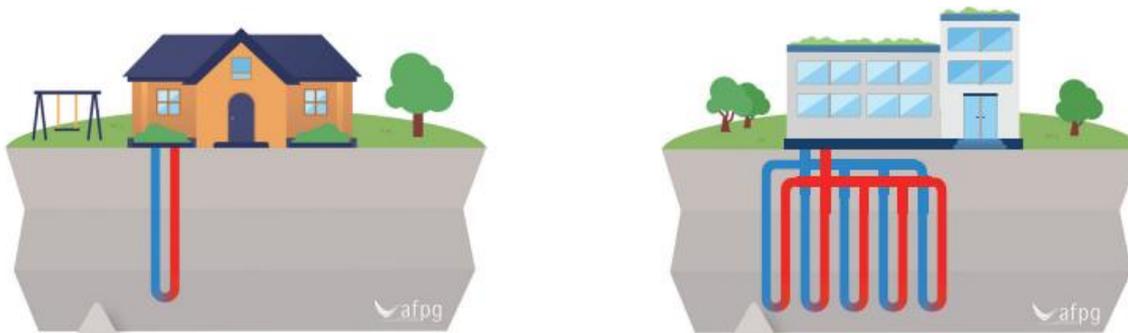


Figure 8 : Schéma de principe du captage par SGV (à gauche) et schéma de principe du captage par CSGV (à droite) (Source : AFPG)

- **Le captage horizontal**

Ce système est constitué de tubes situés entre 80 cm et 120 cm de profondeur, dans lesquels circule de l'eau glycolée en circuit fermé comme pour le captage sur sondes verticales (Figure 9). L'énergie captée à cette profondeur est d'origine géo solaire (rayonnement solaire, ruissellement des eaux de pluie).

Cette solution est peu coûteuse car elle ne nécessite pas de forage, elle est aussi rapide à mettre en place mais demande une surface importante. Les installations occupent une surface de l'ordre de 100% à 200% de la surface à chauffer selon l'isolation du bâtiment [13].



Figure 9 : Schéma de principe du captage horizontal (Source : AFPG)

- **Les échangeurs compacts**

Cette solution de captage est encore peu déployée, elle est une alternative aux sondes verticales et aux nappes horizontales. Ces échangeurs sont installés à quelques mètres de profondeur et

peuvent prendre différentes formes (mur géothermique, corbeilles géothermiques) (Figure 10). Leur utilisation est particulièrement adaptée à une maison individuelle ainsi qu'aux bâtiments de taille moyenne (< 500 m<sup>2</sup>) [13].



Figure 10 : Schéma de principe d'un mur géothermique (Source : AFPG)

- **Comparaison des différentes puissances suivant le type de captage**

Chaque dispositif de captage, possède ses caractéristiques de puissance, ces dernières sont énoncées ci-dessous :

**Capteurs horizontaux** : 20 à 25 W/m<sup>2</sup>

**Capteurs verticaux** : 40 à 50 W/m

**Captage sur nappe phréatique** : il faut prévoir un débit d'eau de 200 litres/h/kW en moyenne [13].

- **Comparaison des différentes solutions de captages**

	Sur nappes	Verticale	Horizontale	Échangeurs compacts
<b>Avantages</b>	Modulables et flexible	Flexible	Coût	Forage peu profond
	Puissance élevée	Puissance constante tout au long de l'année	Simplicité de mise en œuvre	Coût
<b>Inconvénients</b>	Nécessité de présences de ressource d'eau souterraine	Coût	Puissance moindre	Faible puissance
	Possibilité de créer des points froids dans la nappe	Nécessité d'un forage profond	Nécessité d'une grande superficie	Peu répandu

Lorsque la ressource est disponible, les installations sur nappe, eau de mer et eaux usées permettent de mobiliser davantage de puissance pour un coût plus avantageux de captage de la ressource. En revanche, les champs de sondes, qui sont déployables sur quasiment l'ensemble du territoire, permettent de répondre aux besoins de plus petites installations et présentent également des coûts d'entretien largement inférieurs [13].

#### 4. Le dispositif de production (échelle individuelle)

- **La pompe à chaleur géothermique**

Une fois la chaleur du sous-sol captée grâce à différentes solutions technologiques, cette dernière est rendue utilisable pour l'habitat par à une pompe à chaleur géothermique (PAC). Grâce à un cycle thermodynamique, ces technologies permettent de valoriser la chaleur présente dans le sol, pour produire soit de la chaleur soit du froid, la Figure 11 présente son fonctionnement :

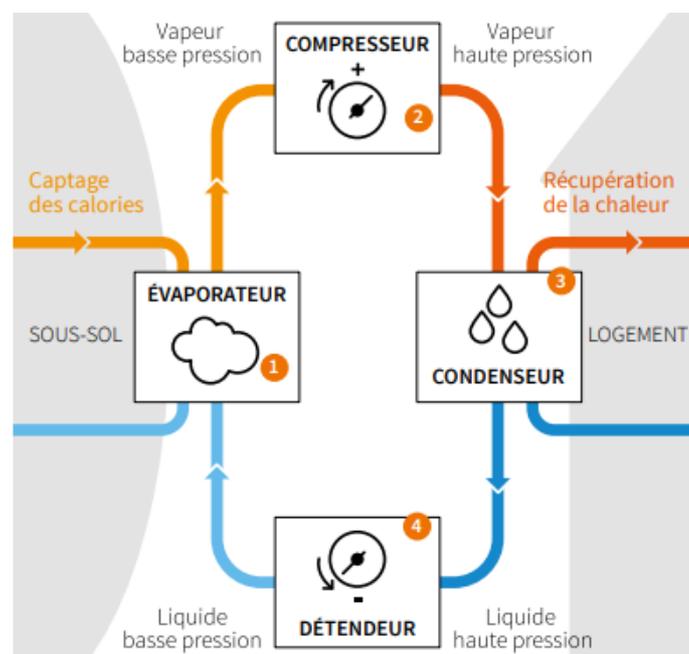


Figure 11 : Cycle thermodynamique de la pompe à chaleur (Source : ADEME la géothermie)

**L'évaporateur :** Le fluide frigorigène à basse pression et à basse température, s'évapore, passant alors en forme de vapeur dans cet échangeur en utilisant l'énergie de la source de chaleur. Le fluide accumule donc de l'énergie du sous-sol.

**Le compresseur :** Le fluide frigorigène est comprimé à haute pression, ce qui entraîne une élévation de sa température.

**Le condenseur :** Le fluide frigorigène se condense, devient liquide, en cédant sa chaleur dans l'échangeur, afin de fournir son énergie au dispositif émetteur présent dans l'habitat.

**Le détendeur :** Le fluide frigorigène liquide est détendu, cette diminution de pression entraîne une chute de sa température.

Ces technologies permettent également de produire du froid grâce à l'inversion du cycle thermodynamique, c'est le principe de fonctionnement d'un frigo. La chaleur est captée dans la zone à refroidir grâce à l'évaporateur puis cette chaleur est rejetée à l'extérieur grâce au condenseur.

Les performances d'une PAC en mode chauffage sont indiquées par son C.O.P. Il s'agit du ratio entre la puissance apportée au logement et la puissance absorbée par le compresseur de la PAC. En géothermie le C.O.P est de l'ordre de 4.

C'est-à-dire que pour 1 kW d'électricité absorbée par la PAC, cette dernière produit 4 kW de chaleur (ou de froid). Il est possible de trouver également l'indication SCOP (Coefficient de performance saisonnier), ce dernier prend en compte les consommations énergétiques sur toute une saison de chauffe, selon, toutes une série d'informations collectées [14].

Pour définir l'efficacité d'une pompe à chaleur en mode climatiseur, on utilise le SEER (Efficacité frigorifique saisonnière), définissant les performances d'un appareil de climatisation sur la période d'utilisation. Il s'agit du rapport entre l'énergie frigorifique produite sur la saison en kWh et l'énergie électrique consommée sur cette même période en kWh.

- **La pompe à chaleur aérothermique**

Lors d'une utilisation en géothermie, la pompe à chaleur va puiser sa source de chaleur dans le sous-sol terrestre. A noter qu'il existe également des PAC aérothermiques, qui puisent leur chaleur dans l'air environnant et fonctionnent avec le même cycle thermodynamique qu'une PAC géothermique. Il existe alors deux types de PAC aérothermiques.

### ◇ La PAC Air/Air

La chaleur de l'air extérieur est captée par le fluide frigorigène qui l'achemine vers l'unité intérieure (Figure 12). Ensuite l'unité intérieure diffuse la chaleur au sein du logement grâce à des ventilo-convecteurs. En inversant le mode de fonctionnement, grâce à une unité Split, votre pompe à chaleur géothermique peut produire de la fraîcheur [15].

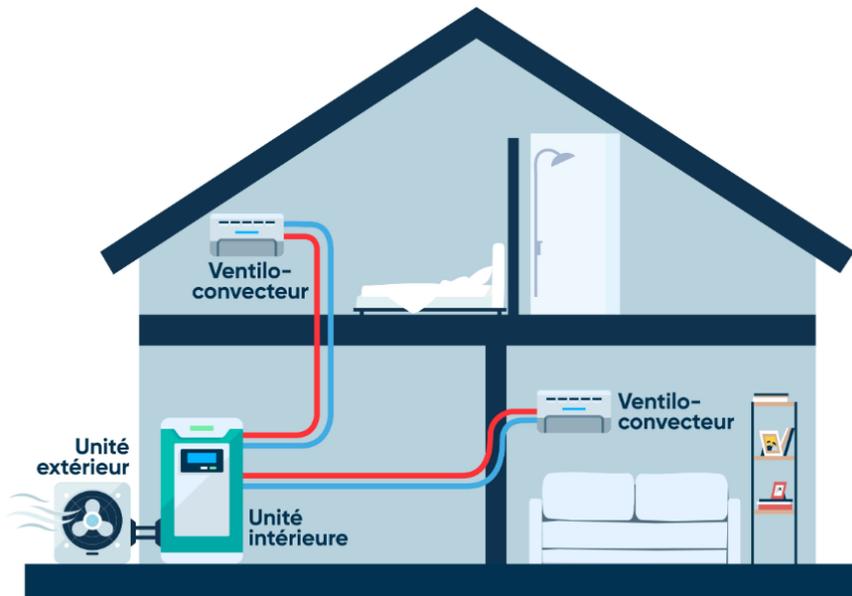


Figure 12 : Schéma de fonctionnement d'une PAC Air/Air (Source : [Quelleenergie.fr](http://Quelleenergie.fr))

### ◇ La PAC Air/Eau

Comme pour la PAC air/air, cette dernière puise sa chaleur dans l'air extérieur grâce à un fluide frigorigène (Figure 13). Un fois cette chaleur transmise à l'unité intérieure, grâce au cycle thermodynamique de la PAC, cette chaleur est transmise aux émetteurs de chauffage (radiateurs, plancher chauffants) et aux points de production d'ECS [15].

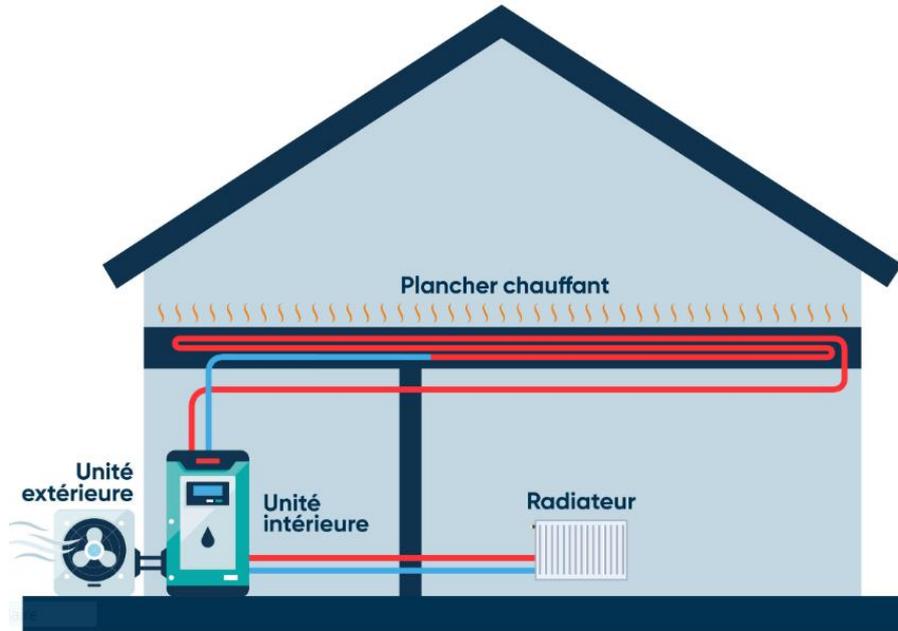


Figure 13 : Schéma de fonctionnement d'une PAC Air/Eau (Source : Quelleenergie.fr)

Les pompes à chaleur aérothermiques disposent d'un avantage en termes de coût et de simplicité d'installation face aux PAC géothermiques mais restent limitées en termes de performances lorsque la température de l'air extérieure devient très faible. On estime que la température limite pour conserver un bon coefficient de performance est aux alentours de 5 à 7°C. De plus, en milieu urbain, lors du fonctionnement en mode climatiseur, la chaleur évacuée de l'habitat est rejetée dans l'air environnant ce qui contribue au phénomène « d'îlot de chaleur urbain » [15].

- **Le geocooling (ou rafraîchissement)**

Le geocooling permet de “ rafraîchir ” un bâtiment grâce à de simples échanges thermiques. On ne passe alors pas par la PAC, on parle de “ bypass “, et on apporte directement la fraîcheur du sous-sol à la surface (Figure 14). Les rendements sont extrêmement élevés : de l'ordre de 3 000 % à 5 000 % (30 à 50 kWh de froid apportés pour 1 kWh d'électricité consommée), car la PAC ne fonctionne pas [13].

Un avantage majeur de cette technologie est que contrairement à d'autres solutions de climatisation, elle ne rejette aucune chaleur à l'extérieur et ne participe donc pas à l'apparition d'îlots de chaleur. C'est donc une solution très avantageuse notamment en période de canicule.

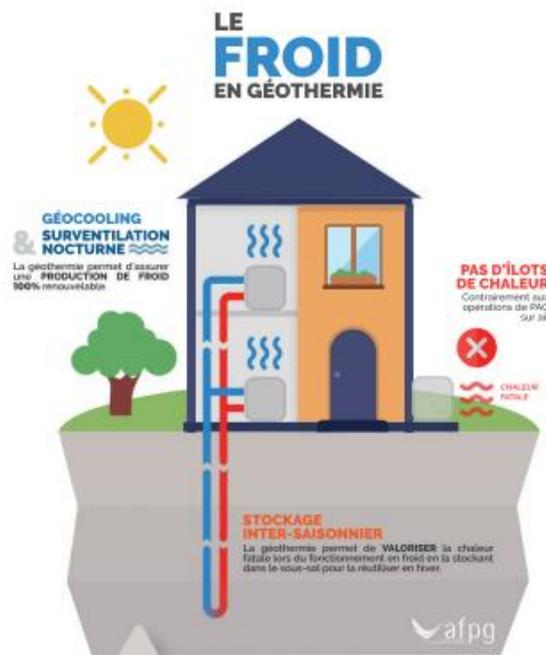


Figure 14 : Principe d'une installation de géothermie utilisant le geocooling (Source : AFPG)

- **La boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (BETEG)**

La boucle d'eau tempérée à énergie géothermique peut être assimilée à réseau de chaleur urbain, avec une température de fonctionnement plus faible que les réseaux traditionnels, avec une température de 5° à 30°C, contre plus de 50°C dans un réseau de chaleur. L'autre différence est que la production de chaleur ou de froid est décentralisée. Les technologies de captage peuvent être couplées afin de fournir l'énergie nécessaire au réseau (Figure 15) [13].

Le BETEG est qualifié de "smart grid thermique", grâce à sa valorisation intelligente de la chaleur entre les différents points de consommation. Par exemple, un bâtiment avec des besoins de froid pourra rejeter ses calories sur la boucle afin qu'elles servent à chauffer un autre bâtiment). Ces réseaux présentent de bonnes performances : énergétique, économique et environnementale.



Figure 15 : Principe d'une boucle d'eau tempérée géothermique

## 5. Avantages

Les avantages de l'utilisation de la géothermie comme source d'énergie, sont multiples, diverses et variés. Ci-dessous, une liste rassemblant les principaux :

- Le Coefficient de Performance (COP) : une pompe à chaleur produit 3 à 4 fois plus d'énergie qu'elle ne consomme d'électricité. Ce qui lui confère un C.O.P. de 3 à 4. Le C.O.P. peut être comparé à un rendement : ce dernier qui se situe toujours en dessous de 1 pour les solutions technologiques de production d'énergie (sauf pour les chaudières gaz à condensation, mais il ne dépasse que très légèrement 1) ;
- Haut rendement énergétique tout au long de l'année du fait des variations négligeables de la température du sous-sol ;
- La géothermie est une source d'énergie inépuisable, pilotable et décarbonée
- Utilisation d'une énergie locale ;
- Capable de fournir du froid et du chaud avec une technologie réversible ;
- Possibilité de produire de l'ECS avec couplage à un ballon d'eau chaude ;
- Adaptabilité du système de diffusion de chaleur dans l'habitat, radiateurs à eau chaude, ventilo-convecteurs ou plancher chauffant ;
- Une fois installé, le captage est invisible et ne présente aucune gêne ;
- Coût d'exploitation faible et stable dans le temps.

## 6. Inconvénients

La géothermie présente néanmoins quelques inconvénients :

- Toutes les solutions de captage ne s'adaptent pas à n'importe quel environnement, c'est un facteur qui pourrait être limitant dans le choix de la technologie. (Exemple : Surface de terrain suffisante pour des capteurs horizontaux, sous-sol de nature à permettre un forage vertical pour des capteurs verticaux, ...)
- Le prix d'achat de la pompe à chaleur peut présenter un frein ;
- En cas d'installation dans un habitat déjà construit il est souvent nécessaire de remplacer les radiateurs en place car ces derniers ont été dimensionnés pour fonctionner avec des températures d'eau plus élevées, environ 75°C de départ d'eau pour des chaudières classiques contre 55°C de température de départ d'eau maximale pour une PAC.

## 7. Échelle

La géothermie permet de s'adapter aux deux échelles de production, collective et individuelle, tout réside dans la ressource disponible en sous-sol, notamment pour l'échelle collective.

A l'échelle individuelle, la production de chaleur et de froid est possible grâce à la PAC. Il est également possible de produire du froid grâce au « geocooling ».

A l'échelle collective (résidentiel et tertiaire), la production de chaleur et de froid est également possible, avec une ressource géothermique suffisante, notamment grâce à un captage sur nappes aquifères.

## 8. Coût

Le coût d'une installation géothermique dépend de deux facteurs : la puissance installée et de la solution de captage mise en place.

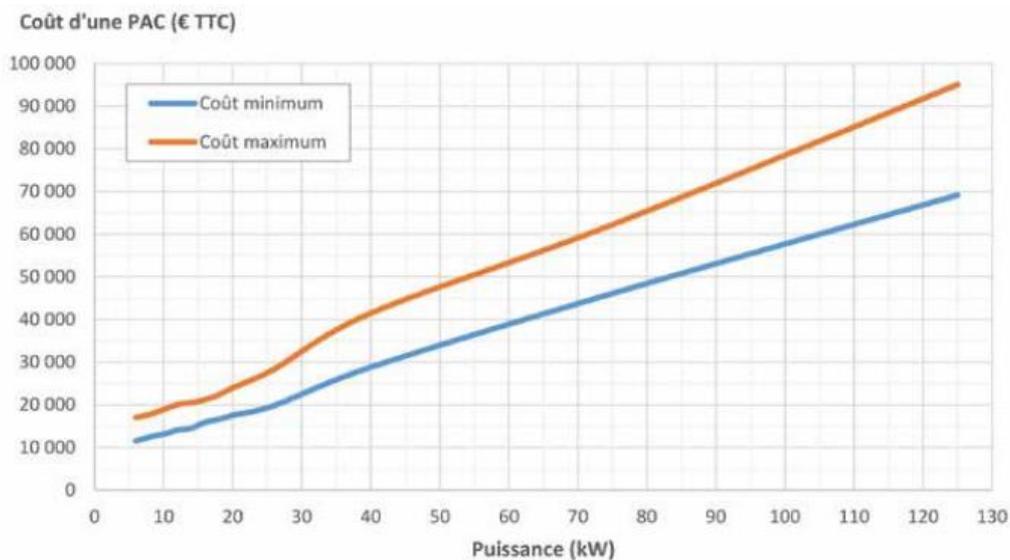
	Géothermie horizontale (0-10 m de profondeur)	Géothermie verticale (10-200 m de profondeur)	Géothermie sur eau de nappe (0-10 m de profondeur)
Captage	3 000 €	9 000 €	4 000 €
Pompe à chaleur	10 000 €	10 000 €	10 000 €
Total de l'opération	13 000 €	19 000 €	14 000 €
<b>Après déduction du crédit d'impôt (CITE)*</b>	<b>9 900 €</b>	<b>14 500 €</b>	<b>11 000 €</b>
<b>Consommation annuelle de chauffage</b>	<b>300 €</b>	<b>250 €</b>	<b>240 €</b>
<b>Consommation annuelle d'eau chaude</b>	<b>140 €</b>	<b>120 €</b>	<b>110 €</b>

\* 30% pour un plafond de 16 000€ de dépenses éligibles, hors main d'œuvre

Tableau 1 : Comparatif des coûts d'une installation géothermique suivant la technologie de captage (Source : ADEME)

Les coûts présentés dans le Tableau 1 représentent les coûts moyens, correspondant aux besoins d'une maison récente de 130 m<sup>2</sup> occupée par quatre personnes. A noter que le CITE (Crédit d'impôt pour la transition énergétique) est maintenant remplacé par l'aide MaPrimeRénov' [14].

L'AFPG (Association Française Pour la Géothermie) a contacté plusieurs fabricants, afin d'estimer le coût de l'investissement d'une PAC. Ces résultats ont permis d'établir des fourchettes de prix pour des PAC géothermiques dans différentes gammes de puissance. Ces résultats sont présentés dans le Graphique 1[16].



Graphique 1 : Évolution du coût selon la puissance pour une PAC géothermique eau glycolée / eau

## 9. Temps de retour sur investissement et durée de vie

Une installation géothermique assure en général un temps de retour sur investissement de 4 à 13 ans, avec des temps plus courts observés dans le cas d'ouvrages collectifs.

Les performances d'une pompe à chaleur sont garanties sur 20 ans, quant aux forages elles sont garanties sur 50 ans en moyenne [17].

## 10. Empreinte carbone

Concernant les émissions de CO<sub>2</sub> par kWh de chauffage produit, la pompe à chaleur se voit également avantagée par rapport aux technologies concurrentes. Le Tableau 2 présente les émissions de CO<sub>2</sub> par kWh de chauffage produit.

Système de chauffage	Emission de CO <sub>2</sub>
Chaudière à bois	30 gCO <sub>2</sub> e/kWh
Pompe à chaleur	49 gCO <sub>2</sub> e/kWh
Réseau de chaleur	100 gCO <sub>2</sub> e/kWh
Radiateur électrique	147 gCO <sub>2</sub> e/kWh
Chaudière gaz	227 gCO <sub>2</sub> e/kWh
Chaudière fioul	324 gCO <sub>2</sub> e/kWh

Tableau 2 : Émissions de CO<sub>2</sub> par kWh de chauffage produit (Source : ADEME)

## 11. Faisabilité sur la commune

Les installations géothermiques avec forage (sondes verticales, forage sur nappe) ; d'une profondeur supérieure à 10 mètres, doivent faire l'objet d'une demande d'autorisation auprès de l'administration. Pour cela il existe trois zones réglementaires :

- **Zones vertes** nécessitant une simple déclaration ;
- **Zones orange** nécessitant l'attestation d'un expert agréé ;
- **Zones rouges** où le projet ne pourra être réalisé qu'après autorisation de l'installation au titre du Code Minier.

Quant à la solution de captage par sondes horizontales, elle peut s'appliquer sur n'importe quel terrain au niveau réglementaire, tant que celui-ci présente une surface suffisante et est dépourvue d'ombrage [16].

## D. La biomasse

On parle de biomasse pour désigner l'ensemble des matières organiques qui peuvent être converties en énergie. La biomasse est et a toujours été l'énergie renouvelable la plus utilisée au niveau mondial, principalement sous la forme de bois. Mais il y a plusieurs voies pour utiliser de la biomasse : la voie sèche qui regroupe la combustion, la gazéification et la pyrolyse et la voie humide désignant la production de biogaz et de digestat. Enfin, il est aussi possible de produire des biocarburants. On utilise souvent la biomasse pour produire de la chaleur mais il est aussi possible d'en faire de l'électricité ou du mouvement.

### 1. Combustion

Il s'agit de brûler un combustible (biogaz ou bois) pour en extraire de l'énergie. La filière bois énergie est très populaire actuellement, à l'échelle individuelle (poêle ou cheminée) et à l'échelle collective avec des centrales à bois reliées à des réseaux de chaleur (chaufferie de la faculté des sciences de Montpellier).



#### a. Fonctionnement

Ce sont des méthodes assez simples à mettre en œuvre, soit on récupère directement la chaleur dégagée par la combustion (c'est le cas d'un poêle par exemple) soit on l'utilise pour chauffer de l'eau et faire tourner une turbine afin de produire de l'électricité. Il est aussi possible de faire de la cogénération.



Poêle à granulés



Poêle à bûches



Chaufferie du campus Triolet

## b. Avantages et inconvénients

### • Pour la filière bois énergie

#### Avantages :

- Energie de chauffage la moins chère [18]
- Différentes formes existent (bûches, granulés, déchets verts, ...)
- Peut permettre de faire de la cogénération
- Peut être associée à un réseau de chaleur
- Très rapide à déployer à l'échelle individuelle
- Meilleure souveraineté énergétique si la ressource est locale
- Le granulé dispose d'avantages en plus par rapport à la bûche (meilleurs rendements, moins de pollution, moins de cendres, moins d'entretien du foyer et de la cheminée, ...)
- Il existe des poêles hybrides pour ne pas reposer sur une seule ressource (bûches et granulés)

#### Inconvénients :

- Pollution de l'air (inférieure pour des granulés par rapport aux bûches)
- Concurrence avec d'autres usages du bois
- La ressource doit absolument être d'origine locale (maximum 50 km du lieu de combustion) pour avoir un impact carbone qui ne soit pas négatif
- Implique une gestion extrêmement rigoureuse de la ressource forestière afin d'assurer l'aspect renouvelable de la ressource et assurer que la combustion soit au moins neutre en carbone
- Sera mise en difficulté par le dérèglement climatique (sécheresses, canicules, incendies, ...)
- Impact carbone dépendant des foyers de combustion dont dispose les usagers
- Pose des questions de sécurité (risques d'incendie, de brûlure, ...)
- Les prix tendent à augmenter
- Effet rebond sur le chauffage car la ressource n'est pas chère
- Granulés conditionnés dans du plastique
- Problèmes sur la disponibilité des granulés
- Un poêle à granulés à rechargement automatique requiert un grand espace

- **Pour l'utilisation de biogaz**

Avantages :

- Cogénération très répandue (donc meilleur rendement)
- Le biogaz est souvent brûlé sur le site où il est produit
- Energie locale donc meilleure souveraineté énergétique

Inconvénients :

- Échelle collective uniquement
- Implantation proche des méthaniseurs donc presque exclusivement dans des régions agricoles
- Pollution de l'air

#### c. Coût, retour sur investissement et durée de vie

Les poêles à bûches sont moins chers que les poêles à granulés, les prix démarrent un peu en dessous de 1000 € et vont jusqu'à plusieurs milliers d'€ pour des bûches.

Dans le cas de l'usage de granulés, les prix sont compris entre plusieurs milliers d'euros pour un poêle et une vingtaine de milliers d'euros pour une chaudière [19].

Concernant les prix de la ressource, pour début novembre 2022 : 0,128 € le kWh de granulés contre 0,0715 € pour le bois en bûches [20].

Le temps de retour sur investissement dépend de l'ancienne source de chaleur utilisée mais il est très souvent inférieur à la dizaine d'années. La durée de vie annoncée est de 15 à 20 ans pour un poêle à granulés et jusqu'à une trentaine d'années pour un poêle à bûches.

Pour une infrastructure à l'échelle collective, on parle plutôt d'investissements de plusieurs millions d'€ qui vivront quelques dizaines d'années.

#### d. Fin de vie

Pour les installations collectives, il est envisageable de viser un renouvellement ciblé de différents organes soit parce qu'ils vieillissent, soit pour en améliorer le rendement soit pour réduire l'impact environnemental. Après quelques décennies, un démantèlement sera à envisager. Dans le cas d'appareils individuels, les métaux sont recyclables après séparation.

### e. Faisabilité sur commune

Pour des maisons individuelles, il est très simple de se tourner vers un système fonctionnant au bois ou à un de ses dérivés (les granulés par exemple). A l'échelle de la collectivité, il faut avoir une densité suffisante de bâtiments à chauffer qui se trouvent proches de l'éventuel lieu d'installation de la centrale à biomasse. Couplée à un réseau de chaleur, il s'agit d'une solution performante et rentable sur le long-terme pour la collectivité et les usagers bien qu'elle représente un investissement considérable.

## 2. Gazéification

Cette méthode vise à produire du syngas (un mélange de monoxyde de carbone et de dihydrogène) qui est combustible et peut être utilisé pour plusieurs usages (production de chaleur, d'électricité, de carburant ou d'autres gaz) Figure 16 [21].

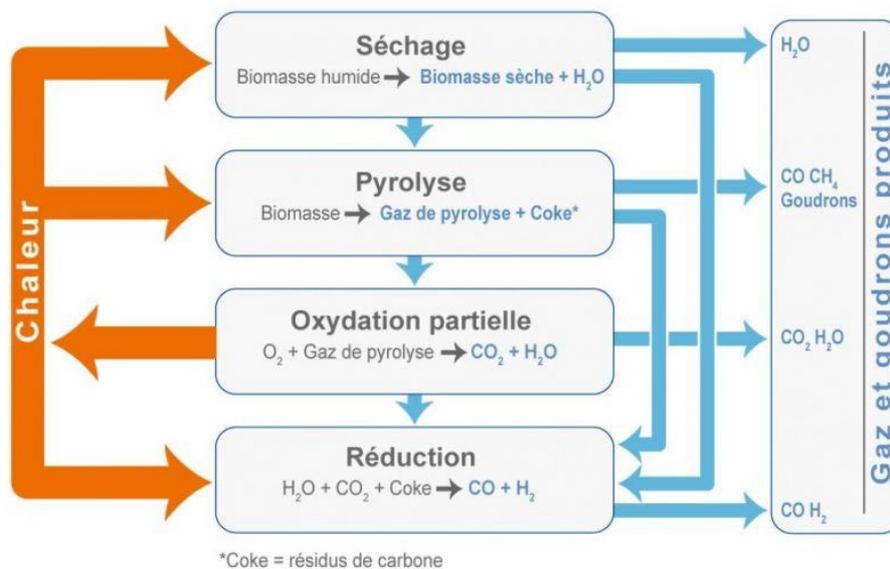


Figure 16 : Processus de gazéification

### a. Fonctionnement

Il s'agit d'une réaction entre de la biomasse, le plus souvent solide (bois et ses dérivés, déchets organiques, charbon, ...) et un mélange gazeux à une température de plus de 1000°C afin de produire le syngas (Figure 16). C'est une méthode très énergivore mais qui permet d'obtenir un combustible plus propre après quelques traitements de ce syngas.

## b. Avantages et inconvénients

Avantages :

- Permet d'obtenir des carburants de synthèse qui sont moins polluants que l'essence ou le diesel issus du raffinage du pétrole ;
- Peut permettre la valorisation des déchets organiques ou des résidus de raffinage du pétrole ;
- Plus performante que l'incinération pour la production d'électricité à partir de déchets
- Pour l'usage de la biomasse, elle engendre une pollution de l'air inférieure.

Inconvénients :

- Très énergivore ;
- Doit être réalisée sur de la biomasse renouvelable (actuellement elle est surtout faite sur du charbon) ;
- Son impact carbone et environnemental dépend de la biomasse utilisée et de sa provenance ;
- Très peu développée ;
- Le syngas doit être purifié pour enlever les différentes impuretés (NOx, H2S, ...) ;
- La matière première doit impérativement être d'origine locale pour diminuer autant que possible son impact carbone et pour baisser les coûts ;
- Rarement pertinente quant à l'usage de bois ;
- L'impact de cette méthode dépend aussi du vecteur énergétique utilisée pour produire la chaleur.

## c. Coût, retour sur investissement et durée de vie

Il s'agit d'installations coûteuses et il y a pour l'instant peu de retours d'expérience sur ce type d'infrastructures. Une unité a été implantée à Strasbourg par Soprema et a coûté 2 millions d'€ pour 13 GWh d'énergie. Ce sont des installations qui vivent plusieurs dizaines d'années.

## d. Fin de vie

Il s'agit de grosses installations dont on peut remplacer certaines parties pour les améliorer ou les prolonger jusqu'au jour il faudra les démanteler.

### e. Faisabilité sur commune

Actuellement, c'est un procédé qui est surtout utilisé pour convertir du charbon, néanmoins c'est une technique qui est amenée à se démocratiser pour traiter de la biomasse renouvelable. Elle n'est pour l'instant pas envisageable pour la commune mais reste tout de même un procédé plus industriel que grand public.

## 3. Pyrolyse

Cette méthode vise à décomposer de la matière organique (surtout de la biomasse lignocellulosique : paille, feuilles, écorces, déchets agricoles, coques de fruits, ...) par l'action d'une température élevée. Cette voie permet d'obtenir différents produits selon le procédé mis en œuvre et la matière utilisée, le plus souvent on obtient un gaz qui peut servir de combustible, un liquide qui est appelé huile pyrolytique (qui peut devenir un carburant) et des matières solides (du charbon de bois et des minéraux pouvant servir d'engrais). Elle est souvent une des premières étapes de la gazéification [22].

### a. Fonctionnement

On introduit de la biomasse dans un réacteur où l'atmosphère est choisie (pas ou extrêmement peu d'oxygène pour éviter la combustion) et on chauffe cette biomasse pour qu'elle atteigne une certaine température (on travaille souvent entre 350°C et 650°C) selon les produits visés, le temps de passage en réacteur influence également les produits obtenus (Figure 17).

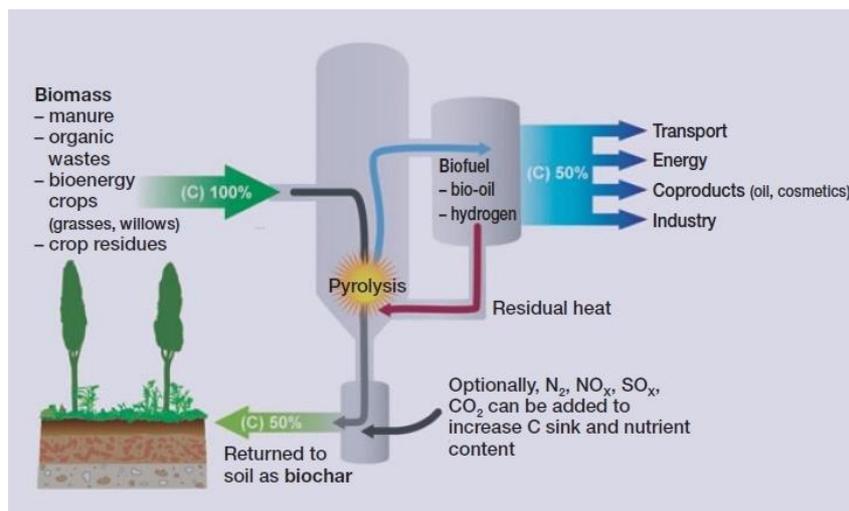


Figure 17 : Processus de pyrolyse

## b. Avantages et inconvénients

Avantages :

- Permet de valoriser des déchets en différents produits
- Complémentaire avec la gazéification
- Pertinente pour le traitement de certains déchets agricoles
- Peut permettre de traiter certains plastiques ainsi que les pneus

Inconvénients :

- Méthode énergivore
- Produits parfois contaminés selon la qualité de la matière entrante
- Très peu développée
- La matière première doit impérativement être d'origine locale pour diminuer autant que possible son impact carbone et pour baisser les coûts
- L'impact de cette méthode dépend aussi du vecteur énergétique utilisée pour produire la chaleur
- Semble pertinente surtout pour le traitement de déchets

## c. Coût, retour sur investissement et durée de vie

Il y a très peu d'informations pour le moment, mais ce sont des infrastructures complexes et coûteuses. Elles devraient pouvoir opérer pendant plusieurs dizaines d'années. Il y a un projet de Total Énergies qui est en cours, il va coûter 57 millions d'euros pour traiter 15 000 tonnes de plastiques. Une infrastructure similaire pour de la biomasse serait cependant bien moins chère car elle n'aurait pas besoin d'avoir recours à de la pétrochimie en fin de transformation [23].

## d. Fin de vie

Pour des infrastructures de cette taille, cela se conclut par un démantèlement de l'usine quand il n'est plus rentable d'en changer des éléments afin de l'entretenir.

## e. Faisabilité sur commune

Cette méthode vise principalement le traitement de déchets, elle est très peu développée pour le moment, donc très chère et il n'y a pas encore de retours d'expérience. Les projets actuels ne ciblent pas particulièrement le traitement de biomasse mais plutôt d'autres déchets. Elle sera

peut-être amenée à se développer mais n'est pour le moment pas envisageable pour la commune de Saint-Aunès.

#### 4. Méthanisation

La méthanisation vise à traiter des déchets organiques afin de produire un digestat et surtout du biogaz. Le digestat est ensuite valorisé en tant qu'intrant agricole et le biogaz est utilisable en tant que combustible. Le biogaz est majoritairement composé de méthane, le reste étant du dioxyde de carbone (Figure 18).

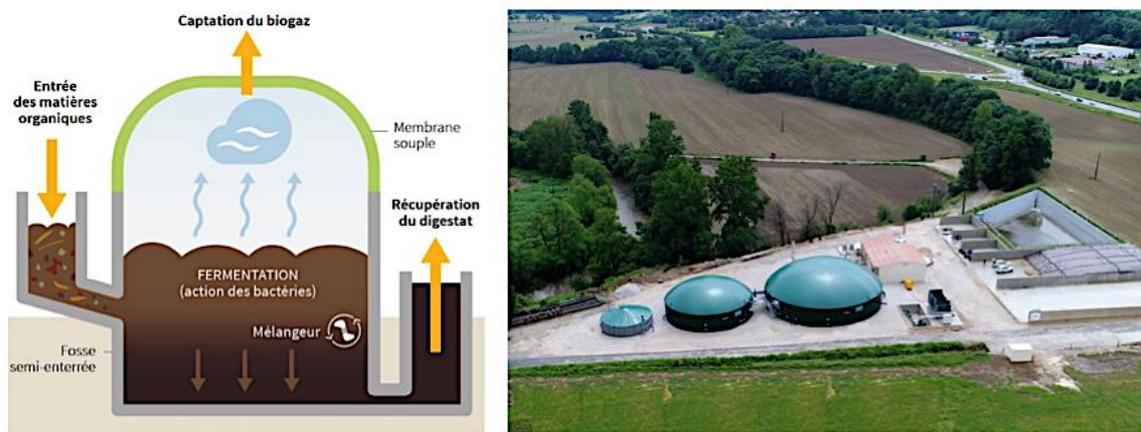


Figure 18 : Processus de méthanisation

C'est une technologie qui est mature et qui se démocratise énormément dans les régions agricoles, il y avait déjà plus de 1175 unités de méthanisation en France au début de cette année selon l'ADEME. Un méthaniseur qui traite 15 000 tonnes de déchets par an permet de chauffer 500 maisons ou de faire rouler 60 bus pendant 1 an [24][25].

##### a. Fonctionnement

La méthanisation repose sur des procédés biologiques de fermentation qui visent à convertir un déchet organique (déchets alimentaires, lisiers, fumiers, ordures ménagères, boues de station d'épuration, ...) en biogaz (qui deviendra ensuite du biométhane) et un digestat (qui est un fertilisant).

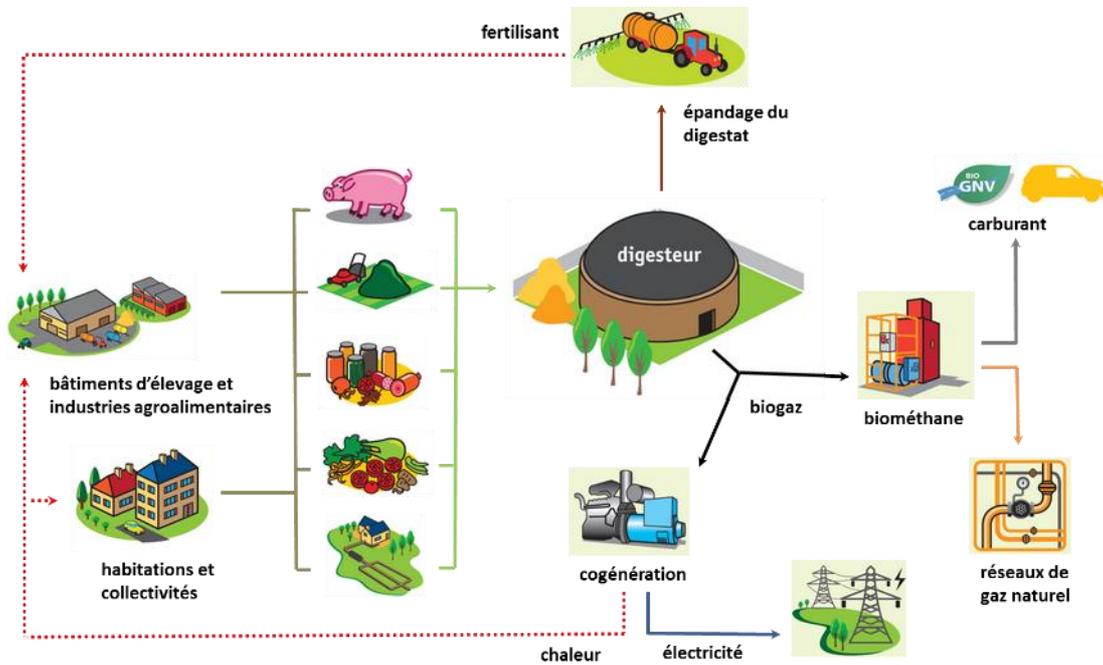


Figure 19 : Schéma de principe de la méthanisation [26]

En détail, la matière organique est stockée dans un cylindre surplombé d'une membrane étanche et élastique (elle permet de stocker le biogaz produit), on appelle cela un digesteur ou un méthaniseur (Figure 19). A l'intérieur de ce méthaniseur, des bactéries vont travailler en l'absence d'oxygène. Cela va forcer différentes réactions biochimiques (hydrolyse, acidogène, acétogénèse puis méthanogénèse) qui vont décomposer la matière organique afin qu'il ne reste plus que les résidus formant le digestat, le reste ayant été converti en biogaz.

### b. Avantages et inconvénients

Avantages :

- Production d'un digestat valorisable en agriculture
- Fonctionne bien dans les zones agricoles
- Ressource locale donc meilleure souveraineté énergétique
- Valorisation de déchets (même certains qui ne sont pas compostables)
- Produit à la fois un combustible et un fertilisant (valorisation énergétique et de la matière)
- Peut permettre d'obtenir un méthane neutre en carbone qui a la capacité de remplacer le gaz fossile
- Peut diminuer le recours aux engrais et donc baisser l'impact carbone de l'agriculture
- Baisse le coût de traitement des déchets

Inconvénients :

- Nuisances olfactives possibles
- Pollution de l'eau
- L'approvisionnement en matière première doit être assuré
- Peut engendrer une pollution des sols
- Système reposant sur un équilibre biologique qu'il faut entretenir
- Le lancement d'une unité de méthanisation peut être délicat
- Traiter le digestat et le biogaz est nécessaire pour en améliorer la qualité et diminuer encore plus leur impact environnemental

La méthanisation a connu son lot de controverse mais une récente analyse de cycle de vie réalisée par l'INRAE annonce qu'il est plus vertueux de méthaniser que de ne pas le faire [27].

#### c. Coût, retour sur investissement et durée de vie

Le ministère de l'agriculture annonçait en 2013 que le méthaniseur moyen installé à la ferme en France était dimensionné pour produire 220 kW électriques en cogénération [28]. Avec un coût entre 6000 et 9000 € par kWe installé dans cette configuration, le digesteur moyen coûte un peu plus d'1,5 million d'euros. Il y a différents dispositifs d'aides visant à améliorer la rentabilité de ces installations et à favoriser leur développement (tarifs de rachat de l'électricité garanti sur 15 ans entre 11 et 20 centimes par kWh produit, aides de l'ADEME, du ministère de l'agriculture, des conseils régionaux ou départementaux, ...)

Le temps de retour sur investissement est compris entre 6 et 20 ans selon le type d'installation et la matière traitée [26].

#### d. Fin de vie

Ce sont des installations qui doivent durer quelques dizaines d'années, ensuite elles sont démantelées. Pour l'instant il n'y a pas de retours d'expérience car c'est une méthode développée récemment.

#### e. Faisabilité sur commune

Il s'agit d'une méthode qui pourrait être pertinente pour Saint-Aunès en fonction des déchets méthanisables produits sur le territoire de la commune. La ville de Montpellier fait rouler une

partie de ses bus au biométhane, il y a donc un potentiel client tout proche pour une partie de la production et les fertilisants trouveront preneurs sans difficulté parmi les agriculteurs des environs.

## 5. Production de biocarburants

On parle de biocarburants pour désigner des carburants qui sont issus de la biomasse. Il en existe 3 générations : la première provient de biomasse alimentaire, la deuxième de biomasse non-alimentaire et la troisième sera axée sur les microalgues. Pour le moment les biocarburants servent d'additifs aux carburants fossiles, il y en a 10% dans le SP95-E10 par exemple. Ils sont en très forte croissance avec une production qui augmente et une utilisation qui tend à se généraliser.

### a. Fonctionnement

Les procédés pour obtenir les biocarburants sont différents selon la génération utilisée.

Pour la génération 1, on fait du bioéthanol à partir de blé, de maïs, de betteraves sucrières et de résidus viti-vinicoles. On obtient cet éthanol par fermentation des sucres contenus dans la matière première. Il peut ensuite être brûlé dans les moteurs à essence. Pour les moteurs diesel, on produit du biodiesel à partir d'huiles végétales (soja, colza, palme, ...) par transestérification. Cette génération est celle qui fonctionne à l'échelle industrielle actuellement avec environ les  $\frac{3}{4}$  de la production qui est du bioéthanol.

Pour la deuxième génération les procédés sont plus complexes car on cherche à traiter de la biomasse lignocellulosique (bois, feuilles, tiges de plantes, déchets agricoles et forestiers, cultures secondaires non-alimentaires, ...). Il y a beaucoup de recherches pour rendre ces procédés viables à l'échelle industrielle.

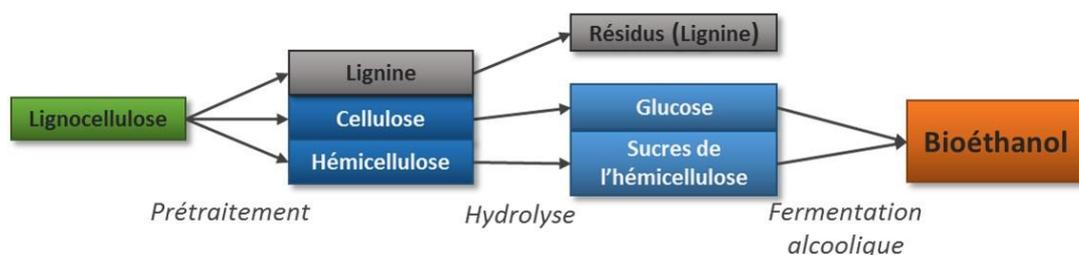


Figure 20 : Production de bioéthanol de deuxième génération [29]

Dans le cas de la génération 3, on doit cultiver des microalgues : soit en photo bioréacteur soit en bassin à ciel ouvert. C'est surtout le biodiesel qui est visé par cette génération mais elle peut

aussi produire du bioéthanol, il y a beaucoup de recherches sur cette voie qui est porteuse de grands espoirs (Figure 20).

#### b. Avantages et inconvénients

- **Pour la génération 1 (biomasse alimentaire)**

Avantages :

- Meilleure souveraineté énergétique si la ressource est locale
- Réduction de l'impact carbone du transport
- Déjà industrialisée
- Favorise l'activité agricole

Inconvénients :

- Concurrence avec l'usage alimentaire de l'agriculture
- Mobilise de grandes surfaces
- Rendement énergétique moins bon que les ressources fossiles
- Production dépendante des saisons
- Certains biodiesels ont un impact carbone supérieur à la ressource fossile
- Doit impérativement être issue d'une production renouvelable (pas de déforestation, pas d'appauvrissement des sols, ...)
- Les coproduits ne sont pas toujours valorisés

- **Pour la génération 2 (biomasse non-alimentaire)**

Avantages :

- Meilleure souveraineté énergétique si la ressource est locale ;
- Réduction de l'impact carbone du transport ;
- Meilleur rendement qu'avec la génération 1 ;
- Favorise l'activité agricole ;
- Peut valoriser les coproduits de la génération 1 ;
- Ressource moins chère que la génération 1.

Inconvénients :

- Mobilise de grandes surfaces ;
- Méthodes plus complexes, donc plus chères ;
- Production dépendante des saisons ;

- Doit impérativement être issue d'une production renouvelable (pas de déforestation, pas d'appauvrissement des sols, ...);
- Encore en cours de recherche et développement.

- **Pour la génération 3 (microalgues)**

Avantages :

- Meilleure souveraineté énergétique si la ressource est locale ;
- Meilleur rendement que les générations précédentes ;
- Mobilise des surfaces bien inférieures aux autres méthodes ;
- Pas besoin d'eau douce ni de terres cultivables ;
- Production toute l'année.

Inconvénients :

- Prix extrêmement élevés ;
- La culture de la ressource doit impérativement être renouvelable ;
- Encore en cours de recherche et développement.

#### c. Coût, retour sur investissement et durée de vie

D'après EDF [30], les coûts de production de biocarburants de génération 2 sont entre 20 et 50% plus élevés que pour un carburant fossile. Pour le consommateur, les biocarburants sont moins chers que les combustibles fossiles car ils ne sont pas taxés de la même manière. Si la génération 2 est proche de la rentabilité économique, la génération 3 devra attendre encore quelques années.

#### d. Fin de vie

La question de la fin de vie ne se pose pas pour les cultures, il faut qu'elles soient soignées pour être véritablement renouvelables. Pour ce qui est des usines qui transforment la biomasse en biocarburants, seules celles de la génération 1 sont en fonctionnement et il est encore trop tôt pour déterminer comment sera gérée leur fin vie.

#### e. Faisabilité sur commune

La production de biocarburants de première génération est celle qui domine actuellement le marché même si elle entre en concurrence avec la culture alimentaire, la seconde génération

est difficilement rentable pour le moment et la troisième est en cours de développement. Cet usage de la biomasse peut avoir un impact environnemental positif et développer encore la culture en France permettrait de baisser la quantité de biocarburants importés d'Amérique du Sud ou d'Asie qui sont issus d'une très forte déforestation. Néanmoins, il semble plus prudent et raisonnable d'attendre un développement des générations 2 ou 3 pour que Saint-Aunès s'engage dans la production de biocarburants.

## II. Les différents systèmes de stockage de l'énergie

L'objectif de cette partie est de présenter les différents moyens qui existent pour stocker de l'énergie. Plusieurs technologies sont envisageables, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients qu'il est nécessaire de détailler afin d'en comprendre le fonctionnement. Ce recensement a aussi pour but de présenter les solutions de stockage qui seraient utilisables et pertinentes pour la commune, autant à l'échelle individuelle que collective [31].

### A. Technologies non envisageables

#### 1. Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)

Les STEP sont des installations hydroélectriques particulières. Elles sont composées de deux bassins situés à des altitudes différentes, elles permettent de stocker de l'énergie.

Ces installations contribuent à maintenir l'équilibre entre production et consommation sur le réseau électrique, tout en limitant les coûts de production lors des pics de consommation. A l'heure actuelle, le transfert d'énergie par pompage hydraulique est la technique la plus mature de stockage stationnaire de l'énergie. [32][33][34]

##### a. Fonctionnement

Une STEP est composée d'un bassin supérieur avec une retenue d'eau et d'un bassin inférieur entre lesquels est placé un groupe hydroélectrique réversible, dit « synchrone ». Ce dernier peut fonctionner comme un ensemble pompe-moteur ou turbine-alternateur (Figure 21). En mode pompe-moteur, il consomme de l'électricité pour pomper l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur, cela se produit lorsque la demande électrique est faible (et le prix de l'électricité peu élevé). En mode turbine-alternateur, il produit de l'électricité lors du transfert d'eau du bassin supérieur vers le bassin inférieur, cela a lieu lorsque la demande électrique augmente.

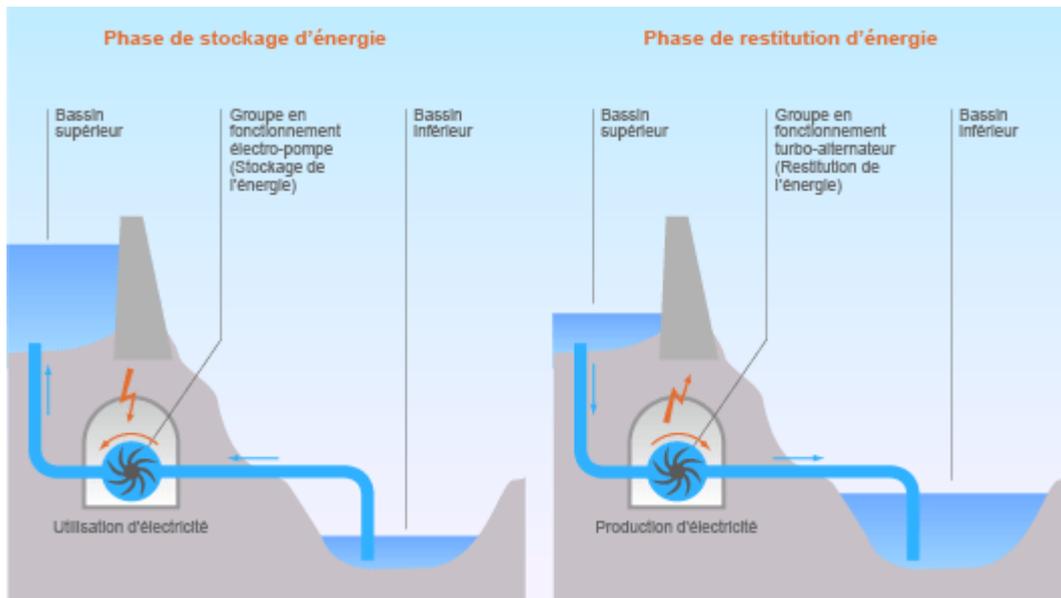


Figure 21 : Principe de fonctionnement d'une centrale STEP

### b. Types

Il existe deux sous-catégories de STEP :

- STEP dites « pures » fonctionnant en circuit fermé avec un apport extérieur d'eau nul ou négligeable ;
- STEP dites « mixtes » qui reçoivent des flux naturels d'eau provenant de l'extérieur. Les deux bassins sont alors situés sur un cours d'eau ou parallèlement à celui-ci et délimités par des barrages. L'intérêt est de profiter du débit de l'eau pour alimenter la turbine. Ils peuvent pomper et turbiner 4 à 5 fois un volume d'eau avant de le restituer au cours d'eau dont il provient. En France, c'est le cas de la STEP de Grand'Maison : le débit de l'Eau d'Olle est significatif à la fonte des neiges et participe au remplissage de la retenue amont de Grand'Maison et aval du Verney.

### c. Avantages et inconvénients

Avantages :

- Le bon rendement (entre 70 et 85 %) ;
- La durée de vie élevée (supérieure à 70 ans) ;
- La technologie est simple, efficace et mature ;
- Le stockage se fait sur du temps long ;
- Le cout du stockage 20 fois inférieur par MWh à celui d'une batterie Li-ion ;
- La sécurisation du réseau électrique.

Inconvénients :

- L'impact possible sur le paysage et l'hydrologie ;
- Les accidents de barrages peuvent être dévastateurs ;
- Le cycle de pompage/turbinage engendre des pertes d'énergie allant de 15 à 30 %.

#### d. Faisabilité sur la commune

Les STEP nécessitent un dénivelé important et un gros volume d'eau, du fait de leur faible densité énergétique : un mètre cube d'eau chutant de 100 mètres produit seulement 0,272 kWh. Elles doivent donc utiliser de très importants volumes d'eau pour produire une quantité significative d'énergie et doivent donc être implantées dans des zones offrant des différences de relief significatives entre les deux bassins. Ces STEP sont donc installées principalement en zone montagneuse mais de nouveaux projets sont actuellement envisagés en bord de littoral (« STEP marines ») et entre des bassins souterrains. Pour qu'un projet de STEP marine soit intéressant, il faut trouver un dénivelé côtier d'une centaine de mètres de hauteur à proximité de la mer. Il faut également que le site ne soit pas protégé par la loi littorale. Il existe de tels sites en Haute-Normandie et dans les zones montagneuses en bord de mer.

Cependant, les investissements pour faire implanter de telles infrastructures sont particulièrement importants et la rentabilité n'est envisageable qu'à long-terme.

La situation géographique de Saint-Aunès, l'absence de relief et de cours d'eau conséquent rendent impossible l'installation d'une STEP sur le territoire de la commune.

## 2. Supercondensateur

Un supercondensateur est une variante du condensateur, un des éléments les plus courants en électronique. Il est une technologie intermédiaire entre le condensateur et la batterie. Ils peuvent donner une tension et un courant élevés (donc beaucoup de puissance, mais tout de même moins qu'un condensateur). Ils stockent plus d'énergie qu'un condensateur mais moins qu'une batterie. L'ordre de grandeur courant est de quelques Wh/kg. Il restitue l'énergie moins vite qu'un condensateur classique mais plus vite qu'une batterie.

### a. Fonctionnement

Comme un condensateur, il est formé de deux plaques qui vont se polariser. L'une va accumuler les charges positives et l'autre, les charges négatives (Figure 22). On libère ensuite l'énergie en laissant les charges s'équilibrer par le biais d'un circuit électrique. Les charges sont le plus souvent des ions stockés dans des électrodes poreuses de grande surface spécifique. C'est principalement une technologie d'appoint destinée à fournir de la puissance, par exemple pour démarrer des appareils.

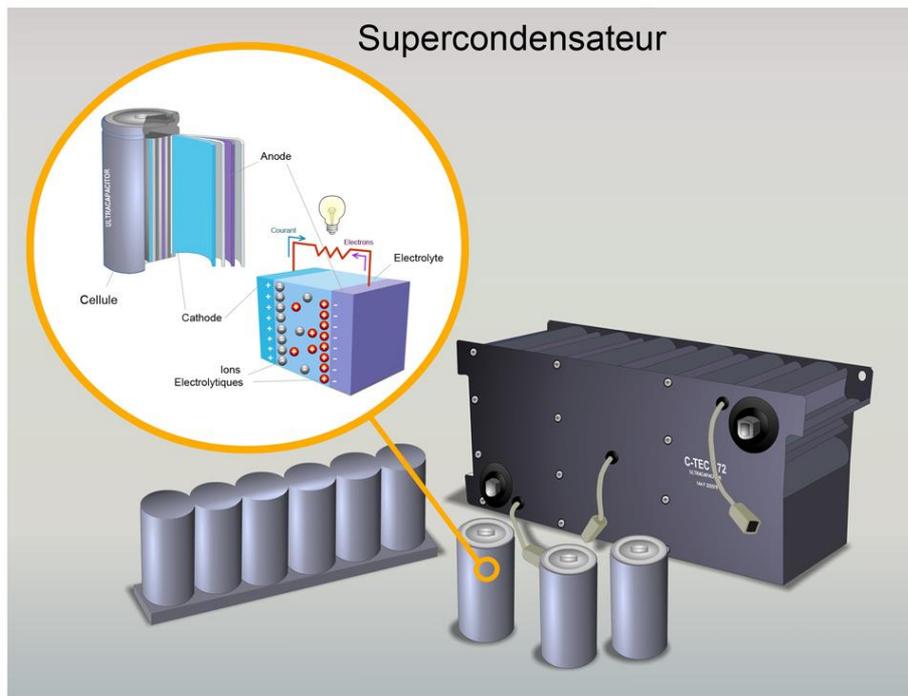


Figure 22 : Schéma du supercondensateur

### b. Avantages et inconvénients

Avantages :

- Cette technologie peut restituer beaucoup de puissance ;
- Elle a un temps de recharge très court ;
- Elle peut stocker sur un temps long ;
- Elle supporte des températures très basses ;
- Elle est de fabrication simple ;
- Le rendement est excellent (proche de 90 %).

Inconvénients :

- Elle a une faible densité énergétique ;
- La restitution de l'énergie se fait sur un temps extrêmement court.

### c. Faisabilité sur la commune

C'est une technologie qui est courante pour optimiser le fonctionnement de différents appareils électriques ou électroniques. Cependant, elle est hors de propos lorsque nous traitons le stockage de grandes quantités d'énergie en vue d'optimiser son usage d'électricité issue de sources renouvelables.

C'est pour cela qu'il ne peut pas être utilisé sur la commune.

## 3. Stockage électromagnétique

Le stockage électromagnétique (SMES) est une méthode qui vise à exploiter des supraconducteurs afin de pouvoir restituer une grande quantité d'énergie sur un temps très court.

### a. Fonctionnement

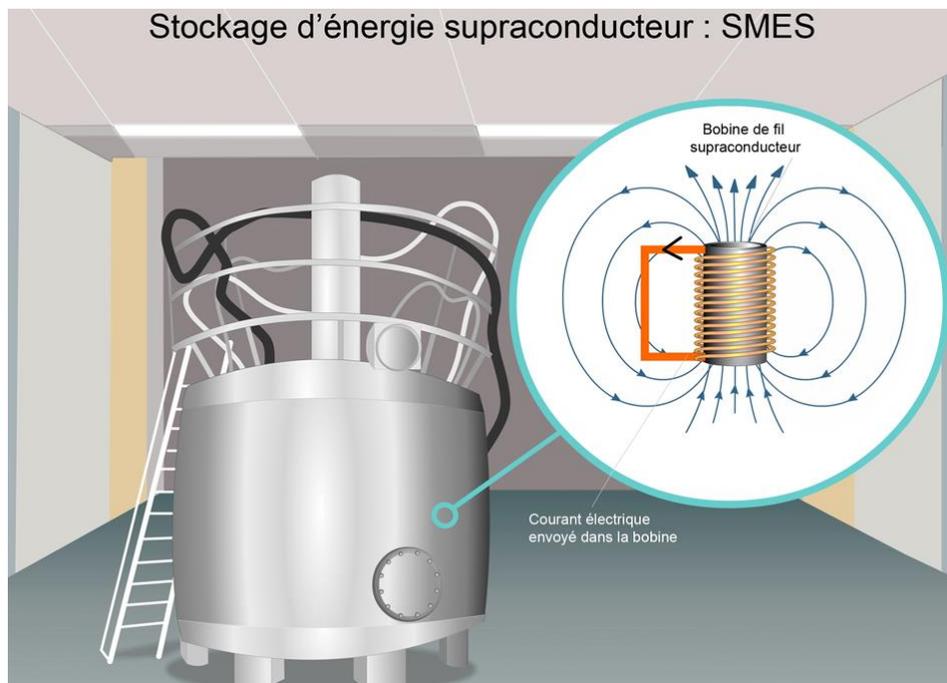


Figure 23 : Schéma d'un stockage électromagnétique par supraconducteur

Le stockage d'énergie magnétique supraconductrice repose sur l'utilisation d'un matériau supraconducteur. Il s'agit de matériaux qui perdent leur résistance électrique s'ils sont suffisamment refroidis (Figure 23). On peut donc imaginer qu'il serait possible de stocker de l'énergie sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant continu à l'intérieur d'une bobine faite d'un matériau supraconducteur.

## b. Avantages et inconvénients

Avantages :

- Le rendement est très bon (75 à plus de 90 %) ;
- Le temps de charge est très court ;
- Cette technologie est très fiable ;
- Les pertes sont remarquablement faibles.

Inconvénients :

- La technologie est assez récente ;
- Elle est très coûteuse ;
- Elle a besoin d'un refroidissement cryogénique.

## c. Faisabilité sur la commune

C'est une technologie encore balbutiante, expérimentale et particulièrement coûteuse. Les applications envisagées sont plutôt tournées vers la propulsion de véhicules électriques (voitures volantes ou avions). Ils peuvent également servir à la stabilisation du réseau électrique. C'est une technologie particulièrement complexe et la contrainte du refroidissement cryogénique est très difficile à gérer. Pour le moment, cette méthode semble encore être un objet de science-fiction plutôt qu'une réelle perspective.

Elle n'est donc pas envisageable sur la commune.

# B. Technologies à surveiller

## 1. Air comprimé

Le stockage de l'énergie par air comprimé (CAES) est un système qui permet de contenir puis de restituer de l'énergie par la mise sous pression d'air puis par sa détente. Ce système utilise l'énergie à stocker pour comprimer de l'air et au moment où l'on veut récupérer cette énergie, il suffit de relâcher l'air comprimé. [35]

### a. Fonctionnement

Le fonctionnement du stockage par air comprimé se décompose en deux phases. Dans une première phase, dite de stockage, un compresseur comprime de l'air ambiant en utilisant l'électricité « verte » produite à partir d'une source renouvelable à un moment où le réseau

n'en a pas besoin. Cet air comprimé est souvent stocké dans une cavité située en sous-sol (Figure 24). Dans une deuxième phase, dite de déstockage, l'air comprimé est extrait du réservoir. Il est injecté avec du gaz dans l'accumulateur puis passe par une turbine munie d'un alternateur pour produire à nouveau de l'énergie électrique. Le seul air comprimé ne suffirait pas à alimenter suffisamment la turbine, il faut une énergie complémentaire comme du gaz.

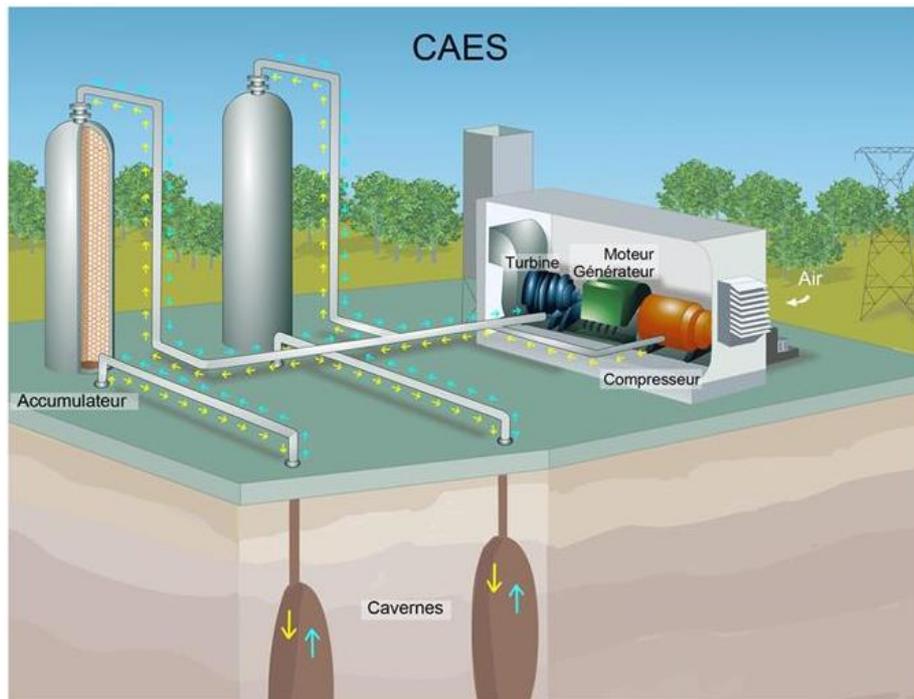


Figure 24 : Schéma d'une installation de stockage d'énergie par air comprimé

## b. Types

### - Types de systèmes CAES

Il existe trois générations de CAES, classées selon les technologies utilisées et leur niveau de maturité :

- Les systèmes CAES conventionnels

Dans les CAES dits conventionnels, l'air chaud comprimé qui sort du compresseur est directement envoyé dans une chambre de stockage. A ce jour, il n'existe toutefois pas de réservoir permettant un stockage de l'air maintenant en même temps une haute température et une haute pression : la chambre de stockage d'un CAES conventionnel assure le maintien en pression du gaz mais pas en température. Lorsque l'air comprimé est extrait du réservoir en phase de déstockage, sa température a donc diminué.

Cela a deux conséquences pour les CAES :

- L'air comprimé doit être préchauffé avant d'être envoyé dans la chambre de combustion en phase de déstockage (par exemple en réutilisant du gaz en sortie de turbine) ;
- L'efficacité d'un CAES conventionnel est d'environ 50 %, ce qui est bien inférieur quand on le compare aux systèmes de stockage les plus courants. A titre de comparaison, l'efficacité des STEP est comprise entre 70 et 85 %. L'efficacité limitée des CAES conventionnels est donc liée à la part d'énergie dissipée sous forme de chaleur.

- Les systèmes CAES adiabatiques

Un système est dit adiabatique quand il n'échange pas de chaleur avec l'extérieur. Les CAES adiabatiques sont donc similaires aux systèmes conventionnels avec l'addition d'un moyen de stocker la chaleur. Face à la difficulté de créer un réservoir pouvant assurer à la fois le maintien sous pression et la conservation de la température, un second réservoir est utilisé pour stocker la chaleur.

Les CAES adiabatiques sont donc constitués d'un réservoir permettant de stocker l'air comprimé (semblable aux réservoirs des CAES conventionnels) et d'un système de stockage thermique récupérant la chaleur de l'air comprimé en sortie de compresseur. En phase de déstockage, cette chaleur est restituée à l'air comprimé avant le passage dans la turbine. Les CAES adiabatiques atteignent grâce à ce système une efficacité de l'ordre de 70%.

- Les systèmes CAES isothermes

Encore au stade du prototype, les systèmes CAES isothermes bénéficient des dernières innovations qui visent à augmenter l'efficacité des CAES. Un processus est dit isotherme lorsque la température du système considéré est uniforme et constante. Un CAES isotherme consiste donc à extraire la chaleur de l'air au fur et à mesure de sa compression (et non pas après sa compression comme dans le cas des systèmes adiabatiques). Ce système aurait une efficacité de l'ordre de 95 % pour le système détenteur/compresseur.

- Types de réservoirs.

Hormis les différences technologiques, les CAES se distinguent par le type de réservoir qu'ils utilisent pour stocker l'air comprimé. Pour des volumes importants, les grottes et autres cavités

géologiques naturelles ou artificielles (mines) sont favorisées. L'installation d'un CAES est dans ce cas tributaire de l'existence de telles cavités ou de la possibilité d'en creuser et donc de la nature du sous-sol.

Pour stocker des volumes plus restreints, des réservoirs artificiels en surface ou enterrés sont privilégiés. Enfin, des solutions alternatives émergent comme les projets de CAES sous-marins dans lesquels le poids de l'eau assure le maintien en pression des réservoirs.

### c. Avantages et inconvénients

Avantages :

- La technologie est peu coûteuse et efficace ;
- Assez sobre en matériaux ;
- La durée de vie est importante (30 ans).

Inconvénients :

- La gestion de la chaleur :

Au moment de la compression, la température de l'air augmente fortement, comme une pompe à bicyclette quand on gonfle une chambre à air. Il est difficile de récupérer cette chaleur.

Or, lors de la phase de décompression, la température baisse et il faut un nouvel apport énergétique, généralement du gaz, pour réchauffer l'air et pouvoir l'utiliser dans la turbine. Le rendement de l'installation est alors faible.

- Le rendement faible (40 à 50%)

Les projets nouveaux visent tous à réutiliser la chaleur de la compression, en la stockant dans un autre réservoir ou dans des roches, ou en installant un système hydraulique. Le rendement peut théoriquement être relevé jusqu'à 65 ou 70 % mais les résultats ne sont pas encore concluants dans la pratique.

- La difficulté de bien dimensionner les cavités du sous-sol en fonction de l'installation en surface

Pour les grandes installations, des cavernes naturelles peuvent être utilisées, à condition qu'elles ne fuient pas. Sinon, il faut creuser des réservoirs artificiels dans le sol et étudier soigneusement les revêtements des parois, qui doivent résister à la fois aux pressions, aux températures et à la corrosion.

- Ne peut être utilisé que pour de grosses quantités d'énergie et des durées courtes
- Ne convient pas à l'échelle individuelle et de temps saisonnière.

#### d. Faisabilité sur la commune

Il s'agit d'une méthode de stockage peu pertinente pour Saint-Aunès, elle n'est pas envisageable à l'échelle individuelle et pour ce qui est de l'échelle collective, d'autres technologies sont bien plus pertinentes et plus efficaces. Si pour le moment ce n'est pas une technologie intéressante pour la commune, des progrès pourraient rendre cette méthode bien plus attractive.

C'est pour cela qu'il ne sera pas utilisé sur la commune pour l'instant.

## 2. Volant d'inertie

Le stockage d'énergie par volant d'inertie vise à emmagasiner de l'énergie cinétique grâce à la rotation d'un objet lourd (une roue ou un cylindre), généralement par un moteur électrique, et à restituer ensuite cette énergie en utilisant le moteur en sens inverse comme générateur d'électricité. [36] [37]

#### a. Fonctionnement

Un système de stockage par inertie moderne se présente généralement sous forme d'un cylindre hermétique dans lequel le vide a été fait pour éliminer la résistance de l'air (Figure 25). Le volant est souvent constitué de matériaux nouveaux (fibres de carbone ou de verre, kevlar, béton) qui résistent mieux que les métaux traditionnels aux très hautes vitesses.

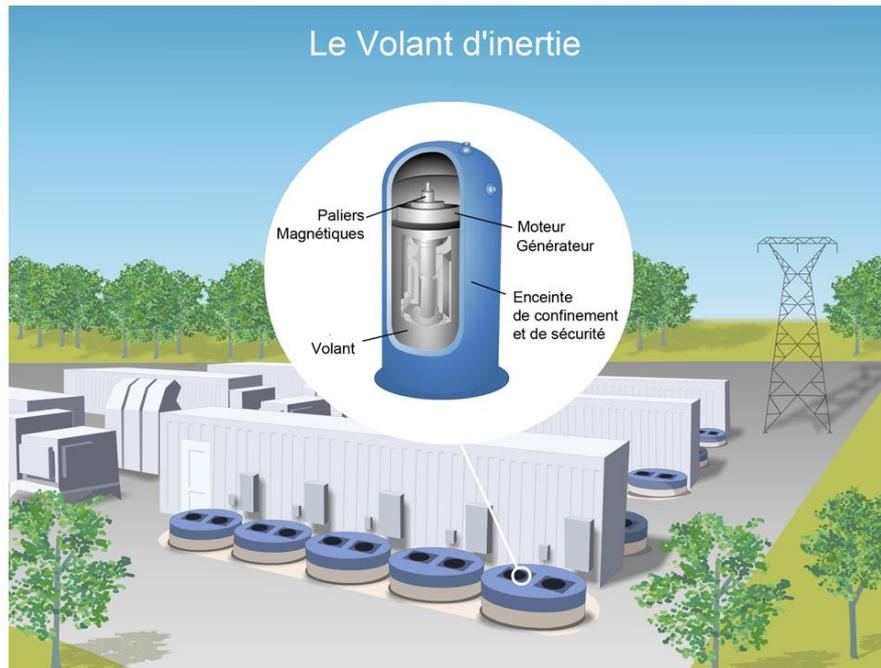


Figure 25 : Schéma d'un volant d'inertie

L'énergie stockée augmente avec la masse et est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation. Dès lors deux « stratégies » de stockage sont possibles. Elles correspondent aux deux typologies de volants d'inertie, dont l'une joue sur la masse, l'autre sur la vitesse :

- Les volants d'inertie basse vitesse : ce sont les systèmes les plus matures, ils mettent en jeu des masses importantes dans des matériaux lourds type acier. Leur vitesse de rotation est inférieure à 10 000 tr/min (tours par minute) ;
- Les volants d'inertie haute vitesse : ils utilisent des matériaux plus légers type fibre de carbone ou de verre. Ils ont des vitesses de rotation pouvant aller jusqu'à 50 000 tr/min.

L'électricité fait tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe cylindrique dans un caisson isolé. L'énergie cinétique entraînée par la rotation du cylindre peut ainsi être conservée. Cette énergie est ensuite récupérée sous forme d'électricité grâce à un alternateur, ce qui réduit progressivement la vitesse de rotation.

Un critère capital pour le fonctionnement d'un volant est la capacité à minimiser les pertes d'énergie lors de la phase stationnaire. Pour ce faire, il est nécessaire de limiter les frottements subis par la masse en rotation. Parmi les solutions utilisées, on peut citer : l'utilisation de roulements à billes haute performance, l'enfermement de la masse dans une enceinte sous vide, la suspension magnétique de la masse, etc.

Un autre élément primordial du choix du matériau de la masse et sa résistance à la rupture. En effet, les vitesses de rotation élevées entraînent des contraintes importantes sur les masses qui, si elles sont mal dimensionnées, peuvent rompre, provoquant alors la destruction immédiate du volant.

#### b. Avantages et inconvénients

Avantages :

- Le haut rendement, puisque 80% de l'énergie absorbée peut être restituée ;
- La mise en route puis une restitution d'énergie très rapide ;
- La technologie ne rejette aucune pollution à l'utilisation ;
- La technologie a une durée de vie très longue (30 ans).

Inconvénients :

- Le temps de stockage limité, autour de 15 minutes. Il faut donc une utilisation très rapide et ponctuelle ;
- Volume et masse des objets mis en rotation qui en font un système peu adaptable.

#### c. Faisabilité sur la commune

Le stockage par inertie est surtout utilisé pour la régulation et l'optimisation d'un système, c'est le cas de certains réseaux électriques par exemple, et non pour assurer une longue durée d'autonomie. D'autres technologies sont donc préférables mais il pourrait devenir pertinent s'il continue de s'améliorer, notamment car il a un impact environnemental plus faible que le stockage par batteries par exemple.

C'est pour cela qu'il ne sera pas utilisé sur la commune pour l'instant.

### 3. Chaleur latente

Le stockage par chaleur latente est une solution de stockage thermique qui exploite la chaleur latente d'un Matériau à Changement de Phase (MCP). Il s'agit de sa capacité à passer de l'état solide à l'état liquide (fusion) sous l'effet de la chaleur. L'énergie de changement de phase est absorbée lors de la fusion du MCP et est restituée lors de sa solidification.

### a. Fonctionnement

Le stockage par changement de phase fonctionne en 2 étapes : d'abord la charge puis la décharge. Lors de la charge, donc durant la journée si on exploite la chaleur du soleil, on chauffe le fluide caloporteur (souvent de l'eau), cette eau est ensuite stockée dans un réservoir où se trouve le MCP (dans l'illustration c'est du sel fondu). Après avoir donné sa chaleur au MCP, l'eau recommence le cycle pour être à nouveau chauffée et ainsi apporter encore de l'énergie (Figure 26).

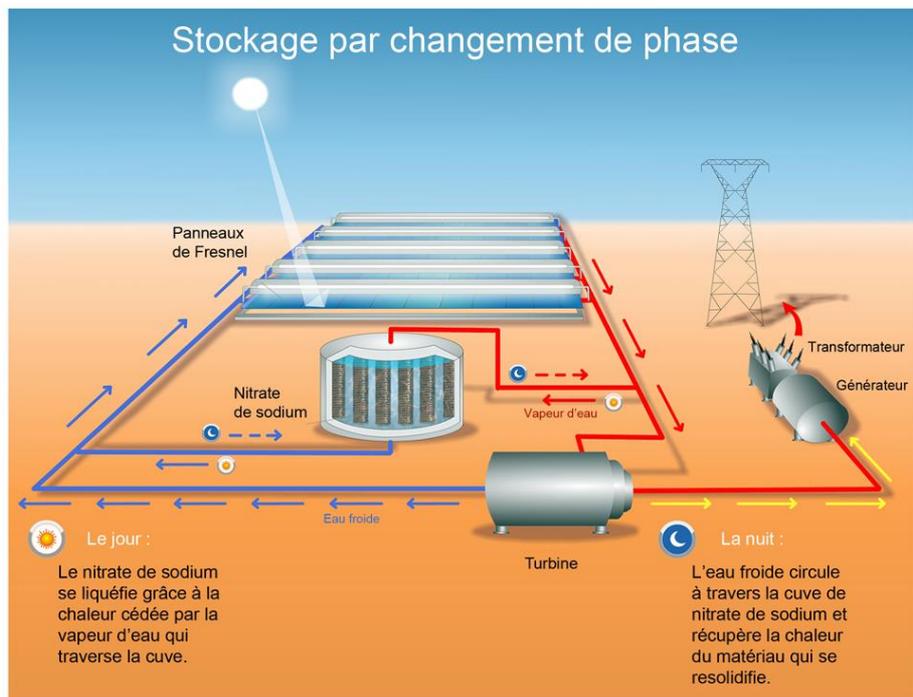


Figure 26 : Principe de fonctionnement d'un stockage à chaleur latente

Lors de la décharge, c'est-à-dire lorsque l'on a besoin de restituer l'énergie, le soir ou la nuit par exemple, le MCP transfère sa chaleur au fluide caloporteur qui passe par une turbine, un générateur et un transformateur pour produire de l'électricité.

Il existe différents matériaux qui permettent le stockage de chaleur latente, et différents fonctionnements puisque certains sont simplement utilisés pour restituer la chaleur. Il existe par exemple des capsules de MCP (par exemple de la paraffine, car sa température de fusion est basse : entre 50 et 70°C), qui peuvent être insérées dans les murs lors de la construction d'une maison. Ces capsules vont changer d'état la journée sous l'action de la chaleur apportée par le rayonnement solaire et restituer cette chaleur au mur quand la température extérieure baisse. L'objectif est de limiter l'effet de paroi froide.

## b. Avantages et inconvénients

Avantages :

- Aide à limiter le décalage entre la production de chaleur fatale (énergie qu'il faut récupérer sinon elle est perdue) et les besoins en chaleur (qu'on peut combler avec l'énergie récupérée) ;
- Densité énergétique plus importante que pour le stockage de chaleur sensible ;
- Température de décharge stable ;
- Température auto-régulée ;
- Systèmes modulaires et adaptables ;
- Grande variété de températures de travail.

Inconvénients

- Limites sur les vitesses de charge et de décharge qui imposent de grandes surfaces d'échange ;
- Mise en œuvre plus complexe que pour le stockage de chaleur sensible ;
- Durée de stockage limitée (pertes thermiques) ;
- Température de fusion du matériau qui est fixée et qui impose certaines conditions d'utilisation ;
- Choix du matériau imposé par la température de travail ;
- Coûts relativement importants comparés au stockage de chaleur sensible.

## c. Faisabilité sur la commune

Le stockage par chaleur latente est chimiquement plus intéressant que le stockage par chaleur sensible, il en découle néanmoins un certain nombre de contraintes, tout particulièrement sur le matériau utilisé. C'est une méthode qui doit continuer à gagner en maturité avant d'être réellement pertinente mais elle pourra être un soutien intéressant pour assurer le confort thermique des habitations.

C'est pour cela qu'il ne sera pas utilisé sur la commune pour l'instant.

#### 4. Stockage thermochimique

Le stockage thermique par voie thermochimique exploite la réversibilité d'une réaction (adsorption-désorption ou chimique) qui est, selon le sens de la réaction considérée, soit endothermique (absorbe de l'énergie) soit exothermique (libère de l'énergie).

##### a. Fonctionnement

- **Stockage par adsorption/désorption**

L'adsorption correspond à la fixation des molécules de gaz à la surface du solide. Ce phénomène est exothermique, donc restitue de la chaleur (décharge de l'énergie). Quant à la désorption, il s'agit de la libération des molécules de gaz de la surface du solide. Ce phénomène est endothermique, donc consomme de la chaleur (stockage de l'énergie).

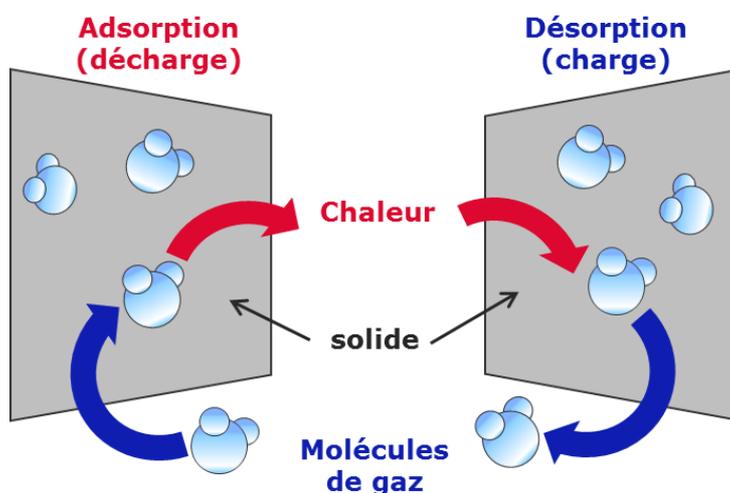


Figure 27 : Principe du stockage de l'énergie par adsorption/désorption

- **Stockage par voie chimique**

Lors de la phase de décomposition/dissociation du produit AB, l'énergie thermique permet de mettre en œuvre la réaction endothermique. C'est l'étape de charge. La réaction étant réversible, la réaliser dans l'autre sens est exothermique et correspond à la phase de formation/restitution. Les produits A et B sont mis en contact afin de régénérer le produit initial AB et restituer une quantité de chaleur. C'est l'étape de décharge de l'énergie.

Les réactions chimiques envisagées sont de la forme suivante :  $AB + Q \leftrightarrow A+B$

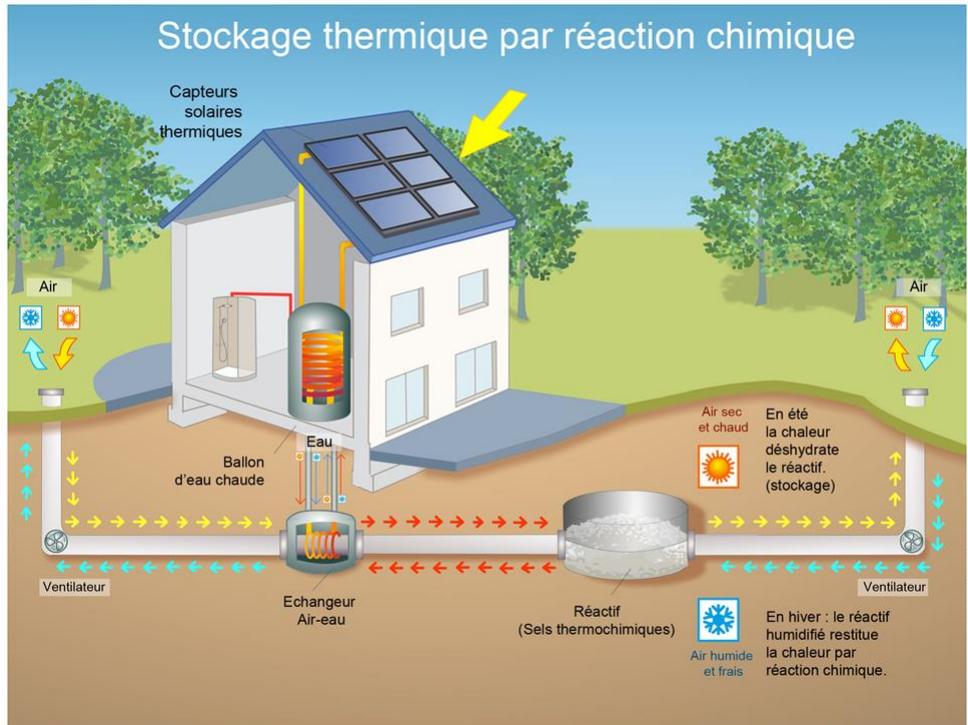


Figure 28 : Principe de fonctionnement du stockage de l'énergie par voie chimique

## b. Avantages et inconvénients

### Avantages :

- Peut exister dans une large gamme de quantités d'énergie ;
- Envisageable autant pour faire du chauffage à basse température que produire de l'ECS ;
- Peut aussi permettre de produire du froid ;
- Densité énergétique plus élevée que pour les autres systèmes de stockage thermique ;
- Il est possible de transporter la chaleur ou le froid stocké ;
- Stockage thermique qui pourrait permettre de stocker à l'échelle de la saison ;
- Méthode de stockage thermique ayant les pertes les plus faibles.

### Inconvénients :

- La technologie et l'intégration entre source et puits de chaleur est complexe ;
- Contrainte sur les produits utilisés qui doivent pouvoir durer dans le temps ;
- Encore coûteux ;
- Fait toujours l'objet de recherche ;
- A besoin de gros volumes de stockage ;
- Le temps de charge est long, limité par le transfert de masse dans le système.

### c. Faisabilité sur la commune

Le stockage thermochimique est la voie de stockage thermique qui suscite le plus d'espoir car c'est la seule qui pourrait permettre d'emmagasiner de la chaleur l'été afin de la restituer l'hiver. Pour l'instant ses performances réelles ne sont pas au niveau maximal que la théorie prévoit et c'est pourquoi cette méthode fait l'objet de recherches. Saint-Aunès ne peut pour le moment pas avoir accès à cette technologie mais peut être qu'à l'avenir elle deviendra incontournable.

C'est pour cela qu'il ne sera pas utilisé sur la commune pour l'instant.

## 5. Hydrogène

L'électricité va permettre de produire, via un électrolyseur, de l'hydrogène. Le gaz est ensuite stocké soit sous forme liquide, gazeuse ou inséré dans des solides, avant d'être consommé dans une pile à combustible. Re combiné à l'oxygène, il va ainsi produire de l'eau et de l'électricité [38].

### a. Fonctionnement

Le processus de stockage de l'électricité sous forme d'hydrogène s'effectue en plusieurs étapes. Dans un premier temps, l'électricité est produite à partir de sources renouvelables comme le solaire, l'éolien ou l'hydroélectricité. Cette énergie est ensuite transformée en hydrogène par électrolyse de l'eau, en dissociant les molécules d'eau on obtient de l'oxygène mais surtout de l'hydrogène. L'hydrogène obtenu est stocké puis retransformé en électricité au moment opportun par le biais d'une pile à combustible (Figure 29).

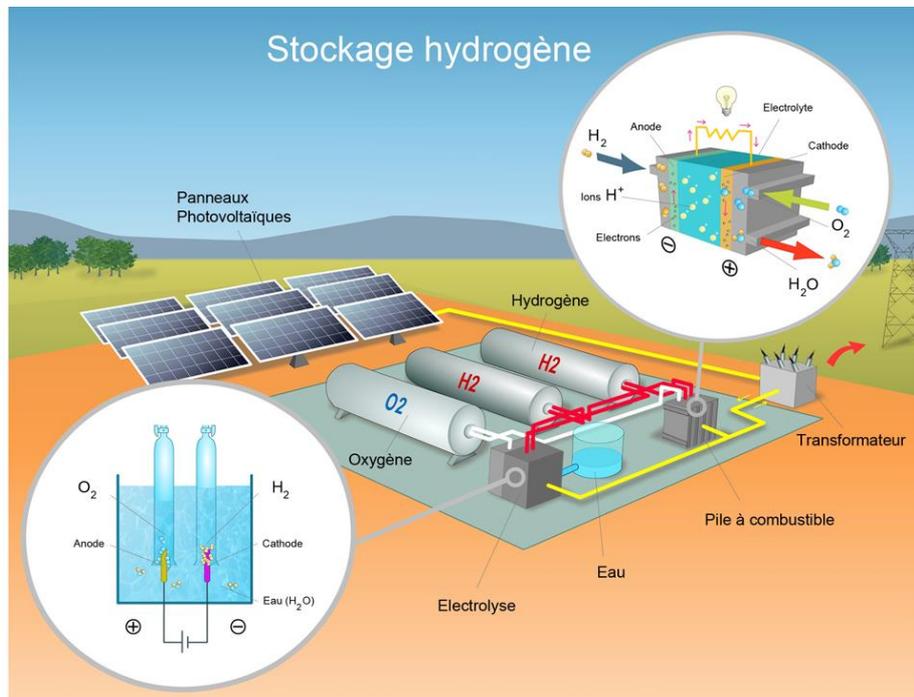


Figure 29 : Processus de stockage de l'hydrogène

## b. Avantages et inconvénients

### Avantages :

- Facile à transporter une fois qu'il est stocké ;
- L'hydrogène contient plus d'énergie par unité de poids que la majorité des combustibles ;
- Stockage de grandes capacités ;
- Enorme variété dans les usages de l'hydrogène (la mobilité, l'industrie, chauffage, ...) ;
- L'électrolyse et les piles à combustible ont de bons rendements.

### Inconvénients :

- Stockage difficile tant sous forme gazeuse que liquide ou par insertion dans les solides ;
- Rendement de la chaîne hydrogène qui est plombé par le rendement des étapes de stockage ;
- Coût des piles à combustible ;
- Les piles à combustible ont des puissances plutôt faibles ;
- Rendements qui sont très variables selon les méthodes utilisées dans les différentes étapes de conversion ;
- La majorité des méthodes d'électrolyse ne sont pas compatibles avec l'intermittence des sources renouvelables que sont le solaire ou l'éolien.

### c. Faisabilité sur la commune

Actuellement, cette technologie est très prometteuse mais encore trop coûteuse dû à l'achat des piles à combustible. Il est aussi nécessaire que les rendements se stabilisent afin d'augmenter le rendement global de la chaîne hydrogène. Ce type de stockage et la technologie est assez récente, il faut attendre qu'elle gagne encore en maturité mais beaucoup de chercheurs travaillent dans ce sens. Cette solution n'est donc pas envisageable pour le moment sur Saint-Aunès mais il est probable qu'elle prenne beaucoup d'ampleur dans les années à venir car l'hydrogène est une technologie particulièrement prometteuse.

## C. Technologies déjà pertinentes

### 1. Batteries

Le stockage d'électricité s'effectue grâce à des réactions électrochimiques qui consistent à faire circuler des ions et des électrons entre deux électrodes. C'est une technologie déjà très courante et que nous côtoyons au quotidien.

Les composants chimiques sont souvent différents d'une technologie à une autre, créant ainsi une grande variété de batteries auxquelles il est possible d'avoir recours pour de nombreux usages. [39][40][41]

#### a. Fonctionnement

Le courant est produit par la circulation de charges électriques entre 2 électrodes (Figure 30). Ces électrodes baignent dans une solution électrolytique (appelée électrolyte), il y a beaucoup de composés qui sont utilisés et s'ils sont souvent liquides il existe aussi du gel et des solides. Pour charger une batterie, on apporte un courant électrique qui force des réactions chimiques à se faire et on stocke les composés produits. Quand on branche la batterie pour qu'elle alimente un dispositif, la décharge se produit spontanément car les composés chimiques se rencontrent et peuvent réagir ensemble puisque le circuit électrique est fermé. Cela libère un courant électrique donc de l'énergie puisqu'il y a une certaine tension entre les électrodes.

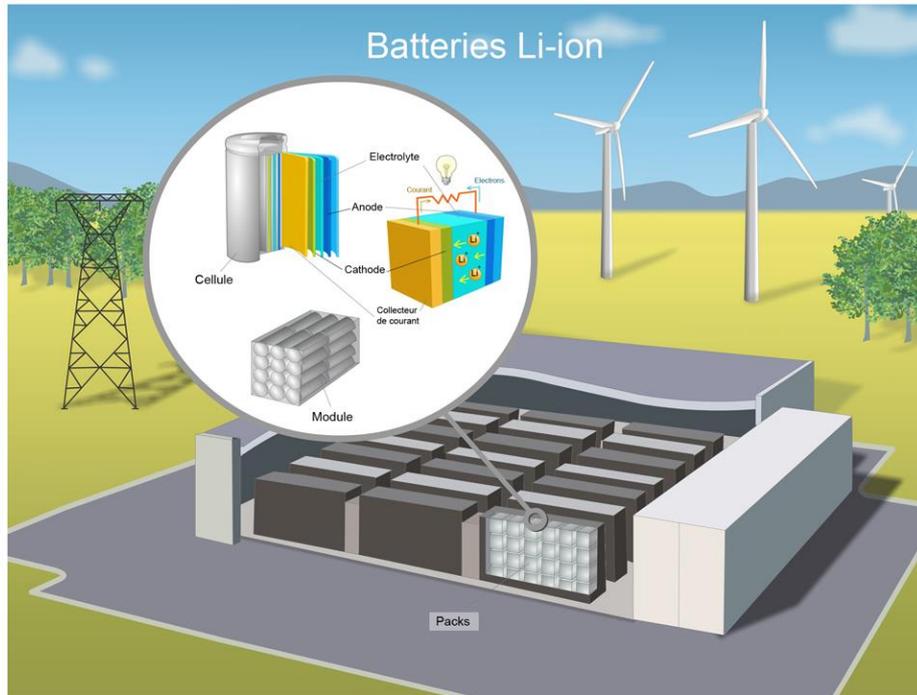


Figure 30 : Batterie Li-ion

## b. Types

Il existe plusieurs types de batteries pouvant être utilisés pour stocker la production d'électricité :

- **La batterie plomb ouvert**

Les batteries plomb ouvert sont des batteries à électrolyte liquide, elles sont assez populaires car leur prix est particulièrement attractif.

Lorsqu'elle fonctionne, la batterie au plomb ouvert consomme de l'électrolyte. Il faut donc surveiller le niveau du liquide et faire un entretien régulier. Il faut également noter que la batterie plomb ouvert n'est pas étanche et qu'elle doit être placée en plein air, elle est très sensible au froid.

Les batteries à plomb ouvert sont à privilégier pour une utilisation occasionnelle et pas trop longue. Il s'agit donc d'une solution plutôt adaptée aux maisons secondaires ou aux habitats mobiles.

- **La batterie AGM**

La batterie AGM (Absorbed Glass Mat) est également une batterie au plomb mais il s'agit néanmoins d'un modèle plus résistant. Elle est un peu plus coûteuse qu'une batterie au plomb

ouvert dont elle se distingue par le fait qu'elle est étanche. Elle est donc intéressante dans la mesure où elle n'a pas besoin d'entretien mais comme toutes les technologies au plomb, elle supporte mal le cyclage répété si la décharge est trop profonde.

Elle pourrait donc être envisagée comme solution de stockage pour du solaire en résidence principale par exemple.

- **La batterie GEL**

Comme la batterie à plomb ouvert et la batterie AGM, la batterie GEL est une batterie au plomb. Elle est très proche de la batterie AGM en termes de possibilités d'utilisation à ceci près qu'elle est légèrement moins adaptée aux pointes de puissance demandées pour des démarrages mais qu'elle peut endurer des décharges plus importantes que les autres technologies au plomb.

Les batteries GEL ont une durée de vie supérieure aux autres batteries au plomb car elles supportent plus de cycles. Mais comme les autres technologies au plomb, elle ne doit pas rester déchargée. Pour ses propriétés, cette technologie est celle que l'on retrouve le plus au sein des kits solaires autonomes.

Au même titre que la batterie AGM, la batterie solaire GEL est tout à fait adaptée à un usage quotidien.

- **La batterie au lithium**

Les technologies à base de lithium sont assez récentes mais se sont déployées particulièrement rapidement car elles ont des performances remarquables.

Elles ne nécessitent aucun entretien et supportent un nombre de cycles bien supérieur à leurs concurrentes.

La batterie solaire au lithium est faite pour une utilisation intensive et quotidienne.

### c. Avantages et inconvénients

- **La batterie plomb ouvert**

Avantages :

- Robuste ;
- Recyclage maîtrisé ;
- Peu chère ;
- Elle est simple et facile à poser.

Inconvénients :

- Son poids ;
- Peu adaptée à des décharges profondes et répétées ;
- Supporte mal les variations de température ;
- Elle nécessite un entretien tous les 6 mois ;
- Elle doit être entreposé à l'extérieur mais doit être protégé.

- **La batterie AGM**

Avantages :

- Adaptée pour fournir des pics de puissance ;
- Ne nécessite pas d'entretien ;
- Robuste ;
- Recyclage maîtrisé ;
- Simple et facile à mettre en œuvre.

Inconvénients :

- Son poids ;
- Supporte mal les températures extrêmes ;
- N'est pas adaptée aux décharges profondes et répétées.

- **La batterie GEL**

Avantages :

- Adaptée pour fournir des pics de puissance ;
- Ne nécessite pas d'entretien ;
- Robuste ;
- Recyclage maîtrisé ;
- Simple et facile à mettre en œuvre.

Inconvénients :

- Son poids ;
- Supporte mal les températures extrêmes ;
- N'est pas adaptée aux décharges profondes et répétées.

- **La batterie au lithium**

Avantages :

- Excellent rendement ;
- Bien meilleure densité énergétique que les autres technologies ;
- Résistante aux décharges profondes ;
- Excellentes performances en charge/décharge ;
- Longue durée de vie.

Inconvénients :

- Son coût est élevé ;
- Elle a un fort impact sur l'environnement ;
- Elle est un peu plus complexe à fabriquer.

#### d. Coût, retour sur investissement et durée de vie

Les retours sur investissement dépendent de différents facteurs : technologie choisie, prix, utilisation, énergie stockable, etc.

- **La batterie plomb ouvert**

C'est la technologie la moins chère mais aussi celle qui a la plus faible durée de vie.

Son coût est entre 100 et 300 € par kWh de stockage pour une batterie au plomb ouvert et sa durée de vie est de 7 ans en moyenne.

- **La batterie AGM**

Elle est intermédiaire entre les 2 autres technologies au plomb que ce soit en termes de coût et de durée de vie.

Son coût est entre 200 à 250 € par kWh de stockage pour une batterie AGM et une durée de vie 10 ans en moyenne.

- **La batterie GEL**

C'est la technologie au plomb la plus performante, donc la plus chère et elle est un peu plus durable que la technologie AGM.

Son coût est entre 200 à 500 € par kWh de stockage pour une batterie au gel et peut fonctionner 12 ans en moyenne.

- **La batterie au lithium**

Les batteries au lithium sont bien plus chères que les technologies au plomb, choisir de s'orienter vers le lithium implique d'avoir un usage intense de cette batterie afin de la rentabiliser. Leurs capacités de stockage sont garanties à au moins 80 % de la valeur nominale à l'horizon des 10 ans.

Son coût est entre 800 à 1 000 € par kWh de stockage pour une batterie lithium-ion et peut fonctionner jusqu'à 15 ans en moyenne.

#### e. Fin de vie

Il est possible de recycler la quasi-totalité des éléments d'une batterie au plomb. Il faut pour cela collecter et transporter les batteries dans une usine de recyclage, en séparer les différents composants puis procéder à la fusion et à l'affinage des composants en plomb. Les composants en plastique peuvent être nettoyés, puis concassés ou fondus pour fabriquer de nouveaux produits. L'électrolyte (acide sulfurique) peut être purifié ou traité, puis éliminé ou recyclé.

La filière de recyclage du plomb est établie depuis plusieurs années, son recyclage n'est donc pas un problème.

Le cas du lithium est plus complexe. Si actuellement il est très difficilement recyclable, la recherche est très active pour améliorer cela. La solution privilégiée pour le moment est de donner une seconde vie aux accumulateurs à base de lithium. L'idée est de diviser de grandes batteries qui ont perdu en capacité en de plus petits modules pour des appareils qui ont besoin d'une plus petite capacité ou pour faire du stockage d'électricité renouvelable. La baisse de la capacité, dans le cas du lithium, n'est donc pas synonyme de fin de vie. Le recyclage de la matière deviendra alors l'étape finale de la vie des cellules au lithium.

#### f. Faisabilité sur la commune

Les technologies au plomb et au lithium ne visent pas les mêmes usages, le lithium est adapté si l'on souhaite tendre vers une autonomie énergétique relative : stockage de grande capacité, capable de fournir une puissance raisonnable et qui peut endurer des cycles profonds et répétés. Les batteries au plomb ne doivent pas être déchargées à plus de 30 % trop régulièrement, peuvent endurer beaucoup moins de cycles et sont donc plutôt adaptées à une optimisation de sa production d'électricité renouvelable. Ce sont donc des technologies possibles à l'échelle individuelle mais qui perdent de leur intérêt lorsque l'on passe à l'échelle collective.

Le stockage dans des batteries à l'échelle individuelle peut avoir intérêt avec le recours au plomb si l'on souhaite simplement optimiser sa production d'électricité ou au lithium si l'on veut tendre vers une autonomie relative. Néanmoins, les batteries sont souvent considérées pour être associées à une production photovoltaïque et en prenant en compte la situation en France métropolitaine, stocker n'apparaît pas comme une solution très rentable ni particulièrement pertinente. Le réseau électrique français est très centralisé et ses piliers sont des centrales nucléaires qui produisent une électricité peu coûteuse et moins émettrice de dioxyde de carbone que le photovoltaïque. Ecologiquement l'impact de la batterie n'est donc pas raisonnable tant que l'on peut être relié au réseau. De plus, les études de cas que nous avons réalisées affirment également que c'est la solution la moins rentable pour le consommateur qui préférera soit la revente totale soit l'autoconsommation avec revente de surplus sur le réseau électrique.

## 2. Chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible exploite le fait de stocker de l'énergie thermique dans un corps qui a la capacité d'en stocker une grande quantité sans changer d'état. Différents dispositifs peuvent exploiter ce principe. C'est le cas du ballon d'eau chaude par exemple, puisque l'eau a une grande capacité calorifique. C'est aussi tout simplement le cas d'une pierre posée près d'une cheminée. Une fois qu'elle a emmagasiné la chaleur, elle peut la restituer [42].

### a. Fonctionnement

Cette méthode consiste à chauffer un milieu liquide ou un solide sans qu'il change de phase. Ce milieu est choisi en fonction du niveau de température requis par l'application. Le stockage et la restitution de la chaleur ne se fait pas à température constante.

Pour des températures inférieures à 100°C, l'eau liquide est le composé le plus largement utilisé. Elle est non toxique, peu chère et très simple à exploiter. Dans cette gamme de température, des systèmes utilisant des roches ou des bétons existent également.

Pour des températures supérieures à 100°C, le stockage de chaleur se réalise dans d'autres milieux liquides comme les sels fondus ou les huiles organiques. Ces composés permettent d'atteindre des températures élevées (jusqu'à environ 350°C pour les huiles et 800°C pour les sels fondus). Ils nécessitent cependant l'utilisation d'un fluide intermédiaire et le coût des matériaux et échangeurs peut être élevé.

Certaines contraintes réglementaires peuvent également être liées à l'utilisation de ces fluides.

Le stockage à haute température peut aussi être réalisé sur des solides comme des bétons à hautes températures ou de la céramique réfractaire (jusqu'à 1000 °C). Les volumes nécessaires sont alors plus importants que pour des milieux liquides.

Lorsque l'on conçoit de grosses centrales, pendant la charge, les héliostats (des miroirs qui ont un dispositif leur permettant de suivre la lumière du soleil) sont dirigés afin de refléter la lumière du soleil vers un récepteur. Un fluide caloporteur, de l'eau par exemple, s'écoule vers ce récepteur où il sera chauffé. Cette eau passe ensuite par un échangeur thermique qui permet de transférer la chaleur au matériau de stockage, des sels fondus par exemple. Après avoir cédé sa chaleur au matériau l'eau recommence le cycle pour à nouveau être chauffée par le récepteur.

Lors de la décharge, lorsque l'on a besoin de restituer l'énergie, donc généralement en soirée, les sels fondus transfèrent leur chaleur au fluide caloporteur qui passe par des échangeurs thermiques, une turbine, un générateur et un transformateur pour produire de l'électricité (Figure 31). Mais il est aussi possible d'utiliser directement cette chaleur.

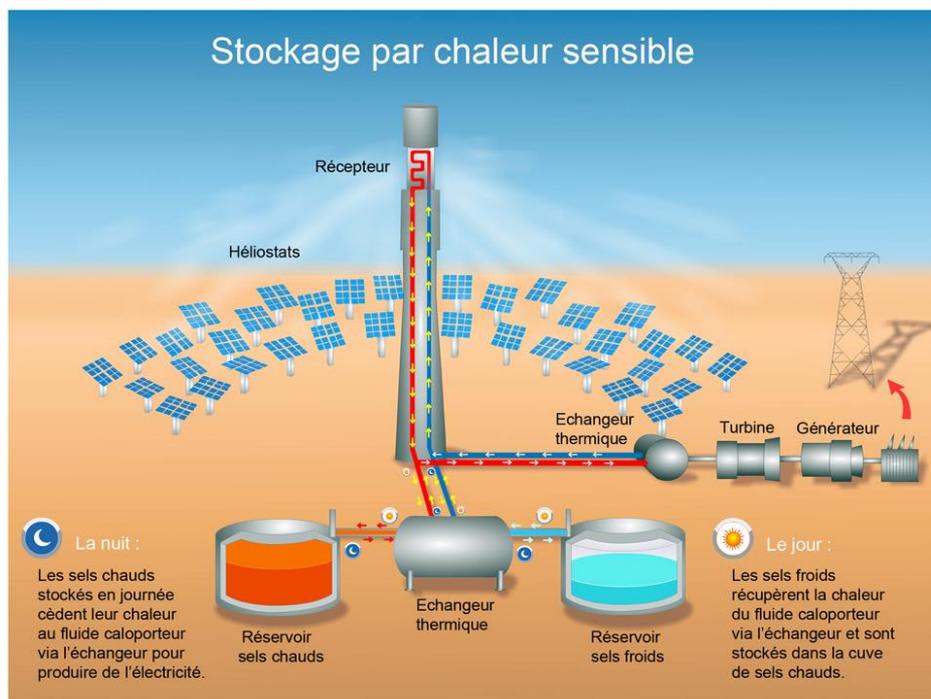


Figure 31 : Principe de fonctionnement d'un stockage à chaleur sensible

## b. Avantages et inconvénients

Avantages :

- Aide à limiter le décalage entre la production de chaleur fatale (énergie qu'il faut récupérer sinon elle est perdue) et les besoins en chaleur (qu'on peut combler avec l'énergie récupérée) ;
- Faibles coûts ;
- Fabrication aisée ;
- Disponibilité des matériaux ;
- Simplicité du procédé.

Inconvénients

- Encombrement ;
- Pertes d'énergie thermique ;
- Durée de stockage limitée ;
- Température de stockage fixée par le composé choisi ;
- Faible densité énergétique.

## c. Coût, retour sur investissement et durée de vie

Le coût pour une centrale de stockage de chaleur sensible dépend de la méthode production. Par exemple, pour une centrale de 200 MW, cela coûte 115 €/kWh produit. Le temps de retour sur investissement est difficile à estimer car ce type de centrale, destiné à stocker de la chaleur à l'échelle collective, est encore trop rare. On peut envisager une durée de vie comprise entre 20 et 30 ans.

Le système de stockage de chaleur sensible le plus courant est tout simplement le ballon d'eau chaude que nous utilisons au quotidien. Il vaut quelques centaines d'euros et vit au moins une dizaine d'années.

## d. Fin de vie

Ce sont les matériaux de stockage et le fluide caloporteur qui déterminent la recyclabilité d'une installation par chaleur sensible.

Si c'est l'eau qui est utilisée en tant que fluide caloporteur, elle ne pose aucun problème. Pour ce qui est du béton, sa filière de recyclage est déjà bien établie grâce au secteur du BTP. Les céramiques réfractaires, elles, peuvent poser un problème car certaines sont classées comme

étant cancérigènes. L'eau étant de loin le matériau le plus courant pour le stockage par chaleur sensible, la fin est parfaitement gérable.

#### e. Faisabilité sur la commune

Ce type de stockage bénéficie d'une certaine maturité car il est mis en jeu dans nos circuits d'eau chaude sanitaire mais aussi dans les circuits de chauffage. Ces applications impliquent des températures de travail différentes mais le stockage par chaleur sensible est une méthode très peu coûteuse et relativement sobre en usage de matériaux. A l'échelle collective, les questions de surface et de volume des infrastructures doivent être étudiées.

C'est une solution qui est déjà très courante à l'échelle individuelle, il serait cependant possible d'y avoir de plus en plus recours en la couplant à de l'énergie solaire pour produire une chaleur renouvelable et la stocker. Pour ce qui est de l'échelle collective, elle pourrait être intéressante mais il faudrait une étude détaillée afin de déterminer si Saint-Aunès a un réel besoin (et les moyens) pour une grosse infrastructure.

### III. Étude de cas des besoins énergétiques

Pour étudier les besoins énergétiques, deux approches ont été retenues, une individuelle à l'échelle de l'habitant ainsi qu'une collective à l'échelle de la commune. Les besoins énergétiques ont été divisés en deux parties, les besoins en électricité et les besoins en chaleur.

#### A. Production d'électricité avec des sources renouvelables

Dans un premier temps, les besoins en électricité ont été étudiés, cette étude se décline en deux étapes, une à l'échelle individuelle ainsi qu'une pour l'échelle collective.

##### 1. Échelle individuelle

Afin de proposer des solutions cohérentes de production d'électricité grâce à des sources renouvelables, il est essentiel de s'intéresser au besoin d'un habitant. Pour cela, des consommations d'électricité moyennes ont été utilisées.

Le Tableau 3 présente les consommations d'électricité moyennes des foyers français suivant leurs superficies et le nombre d'habitants [43].

Taille du foyer	Équipement électrique	Consommation électrique moyenne par an
 Couple dans un appartement de 60m <sup>2</sup>	Tout-électrique, puissance du compteur 6 kVA option Heures Pleines / Heures Creuses	7 218 kWh
 Famille de 4 personnes dans une maison de 120m <sup>2</sup>	Tout-électrique, puissance du compteur 12 kVA option Heures Pleines / Heures Creuses	18 796 kWh

Tableau 3 : Consommation électrique moyenne des foyers français (Source : hellowatt.fr)

Pour un habitat utilisant l'électricité comme seule source énergétique, le chauffage représente 60 % de sa consommation globale. C'est donc sur ce poste de consommation qu'il est intéressant d'agir afin de diminuer sa facture d'électricité [43].

Dans le cas étudié, les besoins en chauffage sont couverts par un équipement énergétique non électrique.

Pour réaliser notre étude de cas générale pour un foyer français, les équipements de production électrique utilisant des énergies renouvelables couvrent 40 % de la consommation moyenne électrique des Français. Cette consommation est liée aux équipements électriques présents dans l’habitat : multimédia, éclairage, cuisson, lavage, ventilation, etc.

Les coûts de la facture d’électricité seront déterminés grâce au tarif réglementé d’EDF. En 2022, le prix d’un kWh d’électricité en France pour les particuliers est de 0,1740 € TTC au tarif réglementé d’EDF pour la puissance de compteurs la plus courante (6 kVA) en option base. Pour un abonnement en option heures pleines/heures creuses, le tarif est de 0,1841 € TTC pour les heures pleines et de 0,1470 € TTC pour les heures creuses [43]. Dans cette étude, le tarif en option base pour un compteur de 6 kVA a été utilisé, soit 0,1740 € TTC/kWh.

Avec ces données, il est possible de déterminer les besoins électriques d’un foyer (hors chauffage) ainsi que le coût de sa facture. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 4.

Nombre de personnes	Surface habitat [m <sup>2</sup> ]	Consommation globale avec chauffage électrique [kWh/an]	Consommation sans le chauffage électrique (40%) [kWh/an]	Facture annuelle [€/an]	Facture annuelle sans le chauffage électrique [€/an]
2	60	7218	<b>2887</b>	1256	502
4	120	18796	<b>7518</b>	3271	1308

Tableau 4 : Consommations électriques moyennes des foyers suivant les critères de l’étude

Ces données permettront de réaliser le dimensionnement des équipements de production d’électricité grâce à des sources renouvelables.

#### a. Production d’électricité par panneaux photovoltaïques

Pour la production d’électricité par panneau photovoltaïque, plusieurs configurations sont possibles :

- Revente totale de l’électricité sur le réseau
- Autoconsommation avec revente de surplus sur le réseau
- Autoconsommation totale avec stockage sur batterie

Ces trois configurations feront l’objet d’une étude de cas afin de déterminer laquelle est la plus avantageuse économiquement. Dans chacune d’entre elles, deux puissances installées seront étudiées, une de 3 kWc et une de 6 kWc.

### i. Étude cas en revente totale sur le réseau

Dans cette partie, sera détaillé le cas d'une production d'électricité photovoltaïque avec revente totale sur le réseau.

- **Paramètres économiques de l'étude**

Lors d'une revente totale, l'Etat a mis en place un tarif de rachat permettant aux producteurs photovoltaïques de vendre leur électricité à EDF Obligation d'Achat à un tarif de rachat préférentiel fixé sur une période de 20 ans. Ces tarifs sont présentés dans le Tableau 5.

Puissance installée	Tarif de rachat EDF OA Revente totale
≤ 3 kWc	0,2022 €/kWh
≤ 9 kWc	0,1718 €/kWh

Tableau 5 : Tarif de rachat EDF selon la puissance installée [44]

- **Paramètres techniques et dimensionnement**

Le tableau 6 présente le dimensionnement des deux installations photovoltaïques, d'une puissance de 3 et 6 kWc.

	Puissance installée [kWc]	Surface de panneaux [m <sup>2</sup> ]	Nombre de panneaux	Électricité produite annuellement [kWh/an]
<b>Cas 1</b>	3	14,9	8	4589
<b>Cas 2</b>	6	32,6	20	9630

Tableau 6 : Dimensionnement des deux installations photovoltaïques

Les valeurs d'énergie produite annuellement ont été obtenues à l'aide de simulations sur le logiciel PVSyst, les graphiques de production annuelle sont disponibles en annexe 1.

- **Temps de retour sur investissement de l'installation**

	Puissance installée [kWc]	Prix de rachat de l'électricité [€/kWh]	Montant de l'électricité revendue [€/an]	Coût de l'installation [€]	Coût de l'installation + remplacement onduleur <sup>1</sup> [€]	Temps de retour sur investissement [an]
<b>Cas 1</b>	3	0,2022	928	9000	10500	<b>11</b>
<b>Cas 2</b>	6	0,1718	1654	14000	15500	<b>9</b>

Tableau 7 : Temps de retour sur investissement des deux installations

<sup>1</sup> L'onduleur est à remplacer au bout de 10 ans.

Nous remarquons que pour une installation photovoltaïque [45], sur une habitation située dans le sud de la France, le temps de retour sur investissement est de 10 ans en moyenne. Ce temps varie légèrement suivant la puissance installée comme le démontre le Tableau 7.

ii. Étude de cas en autoconsommation avec revente de surplus sur le réseau

Dans cette partie, sera détaillé le cas d'une production d'électricité photovoltaïque avec revente de surplus sur le réseau.

- Paramètres économiques de l'étude de cas

Le Tableau 8 présente la grille tarifaire du contrat bleu réglementé d'EDF, cette offre constitue l'offre de référence en France pour le prix d'un abonnement d'électricité.

Puissance [kVA]	Abonnement (€ TTC/mois)	Tarif Base (€ TTC/kWh)
3	8,65 €	0,174 €
6	11,36 €	0,174 €

Tableau 8 : Prix d'un abonnement d'électricité en France [46]

L'étude se concentre sur un contrat d'électricité d'une puissance de 6 kVA avec un tarif d'achat de l'électricité de 0,174 €/kWh.

Le Tableau 9, présente les subventions utilisées pour l'étude de cas en autoconsommation avec revente de surplus.

Puissance installée	Tarif de rachat EDF OA vente de surplus	Tarif de prime à l'autoconsommation
≤ 3 kWc	0,10 €/kWh	430 €/kWc
≤ 9 kWc	0,10 €/kWh	320 €/kWc

Tableau 9 : Tarif de prime à l'autoconsommation [44]

En plus du tarif EDF d'Obligation d'Achat garanti par l'état sur 20 ans, lors d'une installation en autoconsommation, une prime à l'autoconsommation est disponible, cette dernière est en fonction de la puissance installée.

Il est également possible de bénéficier d'une TVA à taux réduit, seulement pour des installations ≤ 3 kWc, ce taux est de 10% [47].

- Paramètres techniques et dimensionnement

Lors d'une installation photovoltaïque en autoconsommation avec revente de surplus, il y a deux paramètres très importants, qui vont déterminer la rentabilité de votre installation :

**Le taux d'autoconsommation** : c'est la part d'électricité produite par les panneaux photovoltaïques qui sera consommée par votre foyer. C'est ce taux qui va déterminer la quantité d'électricité que vous revendrez sur le réseau.

Il se calcule de la manière suivante :

$$T_{ac} = \frac{\text{Electricité produite consommée}}{\text{Electricité produite par l'installation}} * 100$$

**Le taux d'autoproduction** : c'est la part de consommation électrique annuelle du foyer qui va être couverte par la production des panneaux solaires. Il s'agit donc de l'autonomie générée par votre installation. C'est ce taux qui va déterminer l'économie que vous allez réaliser sur votre facture d'électricité initiale.

Il se calcule de la manière suivante :

$$T_{ap} = \frac{\text{Electricité produite consommée}}{\text{Consommation d'électricité totale}} * 100$$

A noter que le taux d'autoconsommation varie suivant les habitudes de consommation du foyer. En effet ce taux rend compte du déphasage entre le moment de production d'électricité photovoltaïque et celui de la consommation dans l'habitat. Pour notre étude, un taux d'autoconsommation de 40% a été utilisé, ce qui correspond au taux moyen des installations photovoltaïques des foyers français. Ainsi, il est maintenant possible de déterminer le taux d'autoproduction de l'installation photovoltaïque.

Cette étude s'intéressera aux besoins en électricité de 2 foyers un de 60 m<sup>2</sup> et l'autre de 120 m<sup>2</sup>, équipés respectivement d'une installation photovoltaïque de 3 et 6 kWc.

Le Tableau 10 présente les paramètres techniques et le dimensionnement des deux installations photovoltaïques avec revente de surplus sur le réseau.

	Consommation électrique annuelle [kWh/an]	Puissance installée [kWc]	Électricité produite annuellement [kWh/an]	Taux autoconsommation	Consommation électrique solaire [kWh/an]	Surplus revendu sur le réseau [kWh/an]	Taux autoproduction
Cas d'une maison de 60 m <sup>2</sup>	2887	3	4589	0,4	1155	1732,32	0,64
Cas d'une maison de 120 m <sup>2</sup>	7518	6	9630	0,4	3007	4511,04	0,51

Tableau 10 : Paramètres techniques des 2 installations photovoltaïques

Les valeurs d'énergie produite annuellement ont été obtenues à l'aide de simulations sur le logiciel PVsyst, les graphiques de production annuelle sont disponibles en annexe 1.

- **Temps de retour sur investissement de l'installation**

Pour déterminer la rentabilité économique de l'installation, il faut déterminer le coût de l'installation des panneaux photovoltaïques auquel on ajoute le remplacement de l'onduleur au bout de 10 ans [44]. (Tableau 11)

	Puissance installée [kWc]	Coût de l'installation photovoltaïque + remplacement de l'onduleur
Maison de 60 m <sup>2</sup>	3	10500
Maison de 120 m <sup>2</sup>	6	15500

Tableau 11 : Coûts des différents types d'installation photovoltaïque [48]

Le tableau 12 présente le temps de retour sur investissement des deux installations suivant les différents paramètres économiques :

Facture initiale [€/an]	Économie réalisée [€/an]	Gain lié à la revente [€/an]	Prix total de l'installation avec déduction de la prime autoconsommation [€]	Temps de retour sur investissement [année]
502	319	275	9210	15
1308	670	578	13580	11

Tableau 12 : Temps de retour sur investissement des deux installations

L'économie annuelle réalisée rend compte du taux d'autoproduction appliqué à notre facture initiale. Cela permet donc de connaître l'autonomie générée par l'installation photovoltaïque. Le temps de retour sur investissement est alors calculé comme ceci :

$$Tri = \frac{\text{Coût totale de l'installation} - \text{prime à l'autoconsommation}}{\text{économie annuelle réalisée} + \text{gain annuelle liée à la revente de surplus}}$$

Le coût de l'installation prend en compte le remplacement de l'onduleur au bout de 10 ans. Nous constatons un temps de retour sur investissement de 15 et 11 ans, pour les installations de 3 kWc et 6 kWc respectivement. Ces temps de retour sur investissement sont légèrement supérieurs à la configuration en revente totale.

### iii. Étude de cas en autoconsommation avec stockage

Dans cette partie, sera détaillé le cas d'une production d'électricité photovoltaïque en autoconsommation totale avec stockage. L'habitation sera alors coupée du réseau électrique national.

#### • Paramètres économiques de l'étude de cas

Afin d'analyser la rentabilité et le temps de retour sur investissement d'une installation en autoconsommation totale avec stockage, il faut étudier le cas suivant : initialement l'habitation achète son électricité sur le réseau électrique national au tarif présenté dans le Tableau 13. Ensuite, l'installation photovoltaïque couplée au stockage par batterie permet à l'habitation de fonctionner en autoconsommation totale.

La rentabilité de l'installation sera donc déterminée en fonction de l'économie réalisée grâce à l'installation photovoltaïque

Puissance [kVA]	Abonnement (€ TTC/mois)	Tarif Base (€ TTC/kWh)
6	11,36 €	0,174 €

Tableau 13 : Tarif d'achat de l'électricité

L'économie réalisée grâce à l'installation photovoltaïque est donc la somme de la consommation annuelle d'électricité sur le réseau et de l'abonnement électrique.

- **Paramètres techniques et dimensionnement**

Afin de réaliser cette troisième étude, les paramètres techniques de l'étude précédente en autoconsommation ont été réutilisés.

	Consommation électrique annuelle [kWh/an]	Puissance installée [kWc]	Électricité produite annuellement [kWh/an]	Taux autoconsommation	Consommation électrique solaire [kWh/an]	Surplus revendu sur le réseau [kWh/an]	Taux autoproduction
Cas d'une maison de 60 m <sup>2</sup>	2887	3	4589	0,4	1155	1732,32	0,64
Cas d'une maison de 120 m <sup>2</sup>	7518	6	9630	0,4	3007	4511,04	0,51

Tableau 14 : Paramètres techniques des 2 installations photovoltaïques

Cependant, lors de l'installation du système, il faut dimensionner les batteries qui vont permettre de stocker le surplus d'électricité. Celles-ci sont dimensionnées en fonction de la quantité d'électricité photovoltaïque produite et non utilisée chaque jour (Tableau 14). C'est donc un stockage sur cycle journalier qui permet d'alimenter en électricité l'habitation lorsque que les panneaux photovoltaïques ne produisent plus d'électricité (Tableau 15).

Quantité journalière d'électricité stockée [kWh/jour]	Dimensionnement réel de la batterie [kWh/jour]	Capacité de stockage pour tension nominale de 12 V [Ah]	Capacité nominale de la batterie [Ah]	Nombre de batteries	Prix des batteries
2,9	3,6	300	265	1	1000
10,0	12,6	1046	265	4	4000

Tableau 15 : Dimensionnement des batteries en fonction de la consommation journalière [49]

- **Temps de retour sur investissement de l'installation**

Pour déterminer la rentabilité économique de l'installation, il faut déterminer le coût de l'installation des panneaux photovoltaïques, le coût de remplacement de l'onduleur au bout de 10 ans [44] et le coût des batteries (Tableau 16).

Facture initiale [€/an]	Économie réalisée [€/an]	Prix total de l'installation avec batteries [€]	Temps de retour sur investissement [année]
502	638,32	11633	18
1308	1444,32	19448	14

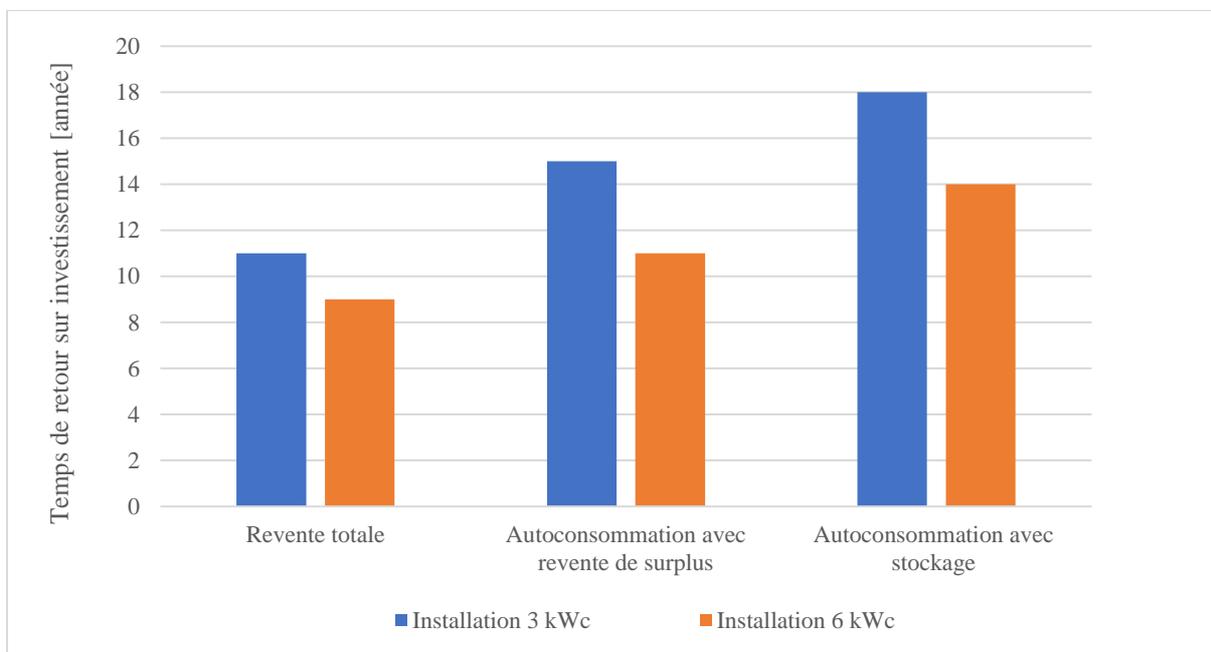
Tableau 16 : Temps de retour sur investissement des deux installations

A noter que pour ce type d'installation coupée du réseau, l'économie annuelle prend également en compte l'abonnement au contrat d'électricité.

Nous remarquons que le temps de retour sur investissement pour une installation photovoltaïque en autonomie totale avec stockage sur batteries, est légèrement plus élevé que pour un système avec revente de surplus sur le réseau. Cela est dû au coût élevé des batteries ainsi qu'à l'absence de subventions pour ce type d'installation.

#### iv. Conclusion de l'étude de production photovoltaïque

Le Graphique 2 reprend les temps de retour sur investissement des installations 3 kWc et 6 kWc pour chaque configuration étudiée.



Graphique 2 : Comparaison des temps de retour sur investissement des installations 3 et 6 kWc

Nous constatons que les installations de 6 kWc permettent d'obtenir des temps de retour sur investissement plus courts pour les trois configurations étudiées. Il est important de rappeler que les installations 3 et 6 kWc ont été implantées sur des habitations de 60 et 120 m<sup>2</sup>. En effet, l'habitation de 120 m<sup>2</sup> dispose d'une consommation électrique (7518 kWh) supérieure à l'habitation de 60 m<sup>2</sup> (2887 kWh). C'est pourquoi l'économie générée sur la facture d'électricité initiale est plus importante pour une installation 6 kWc, se traduisant par un temps de retour sur investissement plus court qu'une installation 3 kWc sur une habitation de 60 m<sup>2</sup>. Enfin, la configuration qui apparaît la plus avantageuse économiquement est la revente totale sur le réseau. Cette tendance pourrait s'inverser en considérant l'augmentation des prix de

l'électricité. Il faut aussi ajouter que ces calculs n'intègrent pas d'éventuels changements d'habitudes qui pourraient faire pencher la balance vers l'autoconsommation avec revente de surplus.

#### b. Production d'électricité par éolienne

L'objectif de cette partie est de simuler l'installation d'une éolienne domestique pour la production d'électricité en autoconsommation avec revente de surplus sur le réseau.

##### i. Étude de cas en autoconsommation avec revente de surplus

- **Paramètres économiques de l'étude de cas**

Le Tableau 17, présente la grille tarifaire du contrat bleu réglementé d'EDF, cette offre constitue l'offre de référence en France pour le prix d'un abonnement d'électricité.

Puissance [kVA]	Abonnement (€ TTC/mois)	Tarif Base (€ TTC/kWh)
3	8,65 €	0,174 €
6	11,36 €	0,174 €

Tableau 17 : Prix d'un abonnement d'électricité en France [46]

L'étude se concentre sur un contrat d'électricité d'une puissance de 6 kVA avec un tarif d'achat de l'électricité de 0,174 €/kWh.

Le prix de rachat de l'électricité produite par une éolienne domestique est actuellement de 0,082 €/kWh de la première à la dixième année. Et de 0,028 € à 0,082 €/kWh de la dixième à la quinzième année [50].

- **Paramètres techniques et dimensionnement**

Pour cette étude de cas, les données de consommation électrique (hormis le chauffage) moyenne d'une maison de 60 m<sup>2</sup> et de 120 m<sup>2</sup> ont été utilisées. Une installation a donc été dimensionnée par rapport aux consommations électriques des deux foyers. Le Tableau 18 présente les données liées à l'installation d'une éolienne domestique d'une puissance de 1 et 5 kW.

	Consommation électrique annuelle [kWh/an]	Facture initiale [€/an]	Puissance installée [kW]	Énergie produite annuellement [kWh/an]
Cas d'une maison de 60 m <sup>2</sup>	2887	502	1	<b>2500</b>
Cas d'une maison de 120 m <sup>2</sup>	7518	1308	5	<b>12500</b>

Tableau 18 : Énergie produite annuellement par les deux types d'éolienne

Le choix de se positionner dans la configuration d'une autoconsommation est dû au faible tarif de rachat de l'électricité de l'éolien domestique (0,082 €/kWh). Au vu de ce tarif de rachat et du coût de l'installation, une revente totale sur le réseau n'est pas une solution économiquement rentable pour le particulier.

De plus, l'éolien domestique est souvent limité à 5 kW et les mâts ne dépassent généralement pas les 30 m, ce qui n'est déjà pas négligeable. Au regard de la réglementation, seules les éoliennes de plus de 12 m nécessitent un permis de construire. En dessous de cette hauteur, il n'y a pas de formalité administrative, sauf dans le cas des zones protégées où le dépôt d'une déclaration de travaux est obligatoire. A noter que si le mât dépasse 50 m, il faut réaliser une étude d'impact (notamment pour la protection des oiseaux) [51].

- **Temps de retour sur investissement de l'installation**

Grâce au dimensionnement, le coût de l'installation ainsi que le temps de retour sur investissement ont pu être déterminés (Tableau 19).

Facture initiale [€/an]	Économie réalisée [€/an]	Gain lié à la revente [€/an]	Prix total de l'installation [€]	Temps de retour sur investissement [année]
<b>502</b>	218	103	10000	<b>31</b>
<b>1308</b>	1088	513	30000	<b>19</b>

Tableau 19 : Temps de retour sur investissement pour l'éolienne de 1 et 5 kW

Après analyse, nous pouvons voir que le temps de retour sur investissement reste assez élevé, ceci est dû à un taux de rachat de l'électricité trop faible.

## ii. Conclusion de l'étude de production éolien

Au vu du temps de retour sur investissement élevé des éoliennes individuelles, elles n'apparaissent pas comme le choix de prédilection pour produire une électricité renouvelable à l'échelle du particulier.

A noter que seule une étude de cas en autoconsommation avec revente de surplus a été réalisée à cause du très faible tarif de rachat de l'électricité d'origine éolienne.

En plus d'une position géographique favorable à l'ensoleillement, et du tarif de rachat de l'électricité produite qui est plus élevé, la production d'électricité photovoltaïque est la solution à privilégier à l'échelle individuelle sur la commune de Saint-Aunès.

### 2. Échelle collective

La consommation électrique moyenne d'un français s'élève à 2,22 MWh par personne et par an, avec environ 3 800 habitants la consommation moyenne de la commune de Saint-Aunès est alors de 8,4 GWh électriques sur une année [52].

Ces données permettront de proposer des solutions de production d'électricité d'origine renouvelable pour la commune.

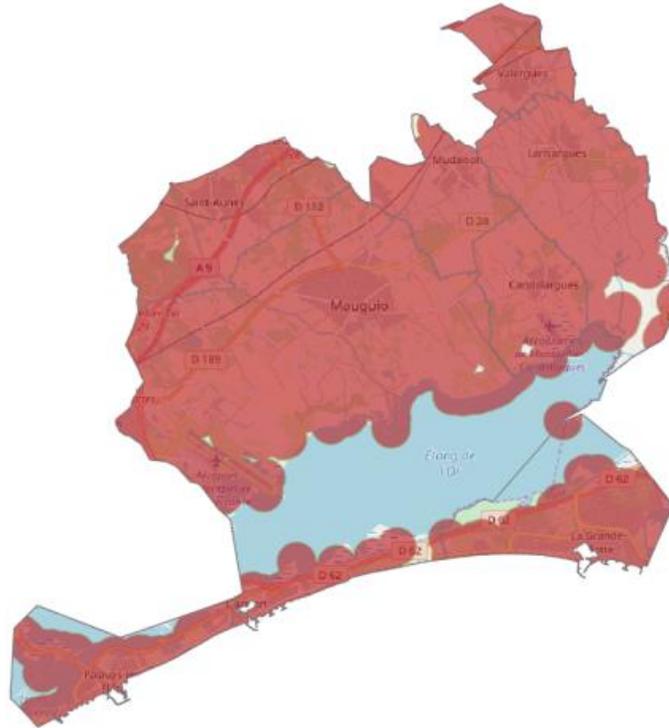
Après analyse du Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET), la mise en place d'un parc éolien apparaît très peu probable sur le territoire du pays de l'or. Actuellement, le territoire ne dispose que d'une zone de développement éolien très limité. En effet, même si celui-ci dispose d'une bonne ressource en vent, les enjeux littoraux, de biodiversité, de paysage, et de proximité des populations et d'infrastructures aériennes sont actuellement trop forts pour envisager ce type d'installation.

Les zones de contraintes liées à l'installation d'un parc éolien ont été cartographiées sur le territoire, de manière à prendre en compte :

- La limite de 500 m de zone tampon autour de toute zone présentant du patrimoine bâti, qui exclue d'ores et déjà 99 % du territoire ;
- La limite de 15 km autour de l'aéroport de Montpellier, relative à la protection des balises radars (VOR) qui recouvre tout le territoire et qui nécessite de fait une autorisation particulière.

Seules deux zones potentielles ont été identifiées dans le PCAET des pays de l'or, sur la commune de Saint-Aunès et de Mudaison.

La Figure 32Figure 32 présente dans la cartographie du PCAET concernant l'installation d'un parc éolien, les zones en rouges représentent les surfaces sur lesquelles l'installation de grand éolien est impossible.



*Figure 32 : Carte des contraintes d'installation de parcs éoliens (zones <500m du parc bâti, zones <15 km de l'aéroport) sur le territoire des Pays de l'Or.*

En considérant ces éléments, l'installation de parcs photovoltaïques apparaît comme la solution la plus cohérente pour produire de l'électricité grâce à une source d'énergie renouvelable.

Nous nous sommes intéressés exclusivement à l'installation de panneaux photovoltaïques en toiture pour la commune, ce type d'installation permet de prendre moins de place au sol en valorisant les toitures. Elle permet également de ne pas artificialiser les sols et de limiter les démarches administratives. En effet, des études d'impact, pour des installations de plus de 250 kW<sub>c</sub> et des permis de construire, sont nécessaires pour l'installation au sol contrairement à l'installation en toiture où il n'y a qu'une déclaration préalable qui est nécessaire. Il faut tout de même prendre en compte d'autres éléments, tels que la compatibilité de la couverture, de la structure et de la charpente du bâtiment, les normes de sécurité ERP (Établissement Recevant du Public), la non-visibilité des panneaux photovoltaïques depuis un monument historique et la délimitation de 500 mètres aux abords de ce monument.

### a. Production d'électricité par panneaux photovoltaïques

Pour cette production d'électricité, nous comparerons ces configurations afin de déterminer la plus économique :

- La revente totale d'électricité sur le réseau
- L'autoconsommation avec revente de surplus sur le réseau

Nous ne prendrons pas en compte l'autoconsommation avec stockage sur batterie car ce type de configuration est très coûteux dû à l'achat des batteries et parce que la place à libérer pour les stocker serait trop importante à cette échelle.

Les coûts de la facture d'électricité seront déterminés grâce au tarif réglementé d'EDF. En 2022, le prix d'un kWh d'électricité en France est de 0,1740 € TTC au tarif réglementé d'EDF. Pour un abonnement en option heures pleines/heures creuses, le tarif est de 0,1841 € TTC pour les heures pleines et de 0,1470 € TTC pour les heures creuses [43]. Dans cette étude le tarif en option base a été utilisé, soit 0,1740 € TTC/kWh.

Nous étudierons trois différentes puissances installées de 100, 250 et 500 kW<sub>c</sub> avec des taux d'autoconsommation également différents, car face à l'impossibilité de les déterminer, plusieurs hypothèses ont été faites.

#### i. Étude de cas en revente totale sur le réseau

##### • Paramètres économiques de l'étude

Comme décrit dans le cas de l'échelle individuelle, lors de la revente totale de l'électricité produite, l'Etat a mis en place un tarif de rachat permettant aux producteurs d'électricité photovoltaïque de la vendre à EDF Obligation d'Achat, filiale d'EDF, à un tarif fixe supérieur à celui du marché pendant 20 ans. Ces tarifs sont présentés dans le Tableau 20.

Puissance installée	Tarif de rachat EDF OA
	Revente totale
≤ 100 kW <sub>c</sub>	0,1070 €/kWh
250 kW <sub>c</sub>	0,1107 €/kWh
≤ 500 kW <sub>c</sub>	

Tableau 20 : Tarif de rachat EDF selon la puissance installée [44]

- **Paramètres techniques et dimensionnement**

Le Tableau 21 présente le dimensionnement des trois installations photovoltaïques de 100, 250 et 500 kWc de puissance.

	<b>Puissance installée [kWc]</b>	<b>Surface totale de panneaux [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Nombre de panneaux</b>	<b>Électricité produite annuellement [kWh/an]</b>
<b>Cas 1</b>	100	450	250	151 131
<b>Cas 2</b>	250	1 125	625	377 828
<b>Cas 3</b>	500	2 250	1 250	755 656

*Tableau 21 : Dimensionnement selon la puissance installée*

Les données des énergies produites annuellement ont été obtenues à l'aide de simulations sur le site PVGYS.

- **Temps de retour sur investissement de l'installation**

	<b>Puissance installée [kWc]</b>	<b>Prix de rachat de l'électricité [€/kWh]</b>	<b>Montant de l'électricité revendue [€/an]</b>	<b>Coût de l'installation [€]</b>	<b>Coût de l'installation + remplacement onduleur * [€]</b>	<b>Temps de retour sur investissement [an]</b>
<b>Cas 1</b>	100	0,1070	16 751	280 000	287 220	17,8
<b>Cas 2</b>	250	0,1107	41 826	700 000	712 220	17,03
<b>Cas 3</b>	500		83 651	1 400 000	1 422 220	17

*Tableau 22 : Temps de retour sur investissement des installations*

\*L'onduleur a une durée de vie de 10 ans en moyenne, un remplacement est donc nécessaire, le cas d'un onduleur de 50 kW de puissance a été pris.

Pour une installation photovoltaïque, sur un bâtiment ou des bâtiments situés au sud de la France, le retour sur investissement est de 17,3 ans en moyenne (Tableau 22)[53, p. 2].

$$Taux = \frac{\text{Coût totale de l'installation}}{\text{gain annuelle liée à la revente de l'électricité}}$$

ii. Étude de cas en autoconsommation avec revente de surplus sur le réseau

- **Paramètres économiques de l'étude**

L'étude se concentre sur un contrat avec un tarif d'achat d'électricité à 0,1740 €/kWh. En plus du tarif EDF d'Obligation d'Achat garanti par l'état sur 20 ans, lors d'une installation avec une configuration en autoconsommation, une prime à l'autoconsommation est disponible, cette dernière est fonction de la puissance installée. Cette prime ne peut être accordée que pour les puissances installées inférieures ou égale à 100 kW<sub>c</sub> (Tableau 23).

Puissance installée [kW <sub>c</sub> ]	Tarif de rachat EDF OA vente de surplus	Tarif de prime à l'autoconsommation
100	0,06 €/kWh	9 €/kW <sub>c</sub>
250	0,1107 €/kWh	
500		

Tableau 23 : Tarif de rachat et de prime à l'autoconsommation [44]

- **Paramètres techniques et dimensionnement**

Comme décrit pour l'échelle individuelle, pour une installation photovoltaïque en autoconsommation avec revente de surplus sur le réseau, deux paramètres sont à prendre en compte pour déterminer la rentabilité des installations, le taux d'autoconsommation et le taux d'autoproduction :

**Le taux d'autoconsommation** est la part d'électricité produite par les panneaux qui sera consommée, ce taux détermine la quantité revendue à EDF.

Il se calcule comme ceci :

$$\text{Taux autoconsommation} = \frac{\text{Electricité produite consommée}}{\text{Production d'électricité totale}} * 100$$

**Le taux d'autoproduction** est la part de consommation électrique annuelle qui sera couverte par la production électrique des panneaux photovoltaïques. C'est un indicateur de l'autonomie des bâtiments par rapport au réseau. Ce taux détermine l'économie que vous réaliserez sur la facture d'électricité, plus ce taux est élevé plus l'économie sera élevée.

Il se calcule comme ceci :

$$\text{Taux autoproduction} = \frac{\text{Electricité produite consommée}}{\text{Consommation d'électricité totale}} * 100$$

Le taux d'autoconsommation peut varier fortement, ne pouvant pas le calculer faute de données détaillées sur la consommation de la commune, trois hypothèses sur ce taux ont été étudiées : 30, 50 et 70 %.

Le Tableau 24 regroupe les paramètres techniques et le dimensionnement des trois installations photovoltaïques avec revente de surplus sur le réseau.

Installation de 100 kWc						
	Consommation électrique annuelle [kWh/an]	Électricité produite annuellement [kWh/an]	Taux autoconsommation [%]	Consommation électricité solaire [kWh/an]	Surplus revendu sur le réseau [kWh/an]	Taux autoproduction [%]
Cas 1	8 400 000	151 131	30	45 339	105 792	0,54
Cas 2			50	75 566	75 566	0,90
Cas 3			70	105 792	45 339	1,26
Installation de 250 kWc						
	Consommation électrique annuelle [kWh/an]	Électricité produite annuellement [kWh/an]	Taux autoconsommation [%]	Consommation électricité solaire [kWh/an]	Surplus revendu sur le réseau [kWh/an]	Taux autoproduction [%]
Cas 1	8 400 000	377 828	30	113 348	264 480	1,35
Cas 2			50	188 914	188 914	2,25
Cas 3			70	264 480	113 348	3,15
Installation de 500 kWc						
	Consommation électrique annuelle [kWh/an]	Électricité produite annuellement [kWh/an]	Taux autoconsommation [%]	Consommation électricité solaire [kWh/an]	Surplus revendu sur le réseau [kWh/an]	Taux autoproduction [%]
Cas 1	8 400 000	755 656	30	226 697	528 959	2,70
Cas 2			50	377 828	377 828	4,50
Cas 3			70	528 959	226 697	6,30

Tableau 24 : Paramètres techniques des installations

Les données des énergies produites annuellement ont été obtenue à l'aide de simulations sur le site PVGYS.

- **Temps de retour sur investissement de l'installation**

Cas 1 : taux autoconsommation de 30%

Cas 2 : taux autoconsommation de 50%

Cas 3 : taux autoconsommation de 70%

Installation de 100 kWc					
	Facture initiale [€/an]	Economie réalisée [€/an]	Gain de la revente d'électricité [€/an]	Coût de l'installation avec déduction de la prime de l'autoconsommation + remplacement onduleur * [€]	Temps de retour sur investissement [an]
Cas 1	1 461 600	14 237	6 348	276 720	19
Cas 2		17 682	4 534		16
Cas 3		21 128	2 720		12,9
Installation de 250 kWc					
	Facture initiale [€/an]	Economie réalisée [€/an]	Gain de la revente d'électricité [€/an]	Coût de l'installation + remplacement onduleur * [€]	Temps de retour sur investissement [an]
Cas 1	1 461 600	49 001	29 278	710 720	15
Cas 2		53 784	20 913		13,2
Cas 3		58 567	17 548		12,1
Installation de 500 kWc					
	Facture initiale [€/an]	Economie réalisée [€/an]	Gain de la revente d'électricité [€/an]	Coût de l'installation + remplacement onduleur * [€]	Temps de retour sur investissement [an]
Cas 1	1 461 600	98 001	58 556	1 420 720	14
Cas 2		107 568	41 826		13,2
Cas 3		117 134	25 095		12,1

Tableau 25 : Temps de retour sur investissement des installations

\*L'onduleur a une durée de vie de 10 ans en moyenne, un remplacement est donc nécessaire.

Le temps de retour sur investissement (TRI) est calculé comme ceci :

$$TRI = \frac{\text{coût total de l'installation (-prime à l'autoconsommation)} *}{\text{économie annuelle réalisée + gain annuel liée à la revente de surplus}}$$

\*Si la puissance installée est inférieure ou égale à 100 kWc.

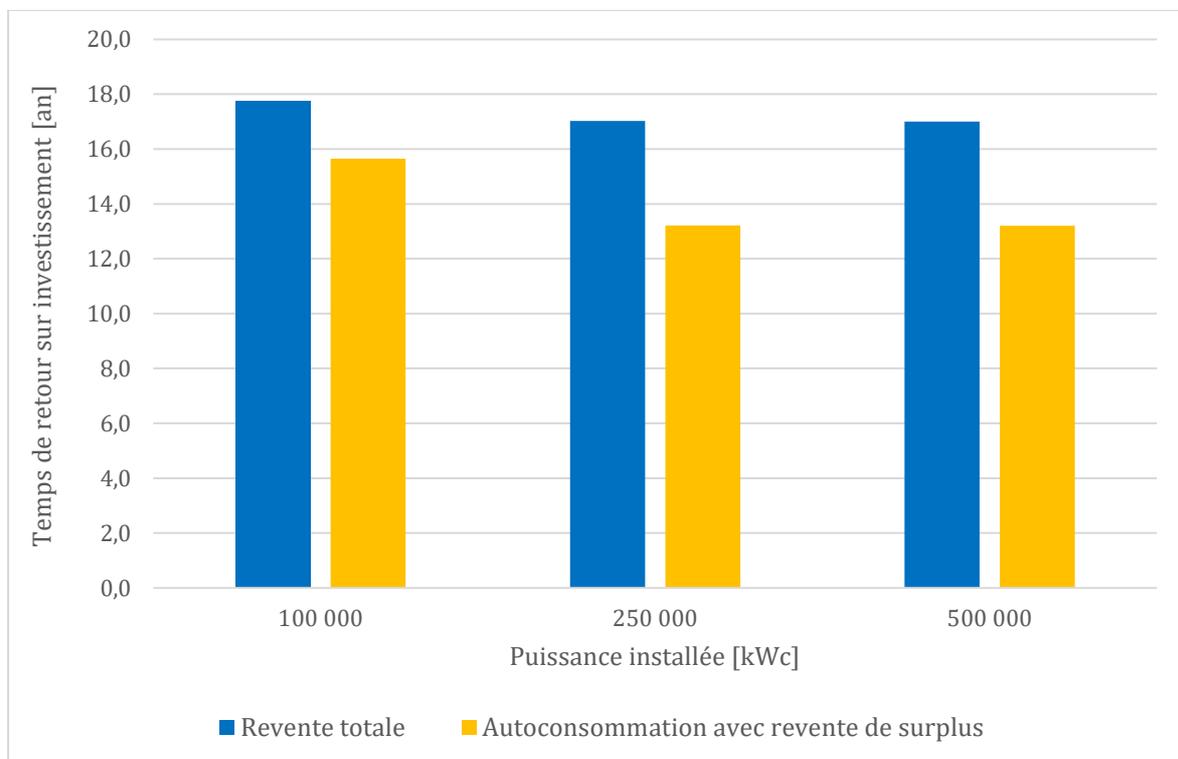
Pour une installation photovoltaïque, sur un ou des bâtiments situés au sud de la France, le retour sur investissement varie entre 12,1 et 19 ans. Ces temps de retour sur investissement

sont généralement plus courts pour cette configuration que celle avec revente totale (Tableau 25).

Les configurations où le taux d'autoconsommation est de 70 % ont un temps retour sur investissement bien plus intéressant.

### iii. Conclusion de l'étude de production photovoltaïque

Le Graphique 3 présente les temps de retour sur investissement des installations de 100 kW<sub>c</sub>, 250 kW<sub>c</sub> et 500 kW<sub>c</sub>, pour chaque configuration étudiée. Pour celle en autoconsommation avec revente de surplus, seule celle avec un taux d'autoconsommation de 50 % a été présentée afin d'avoir une moyenne.



Graphique 3 : Comparaison des temps de retour sur investissement des installations

Lorsque les données de consommations de la commune seront connues, le choix de l'une de ces configurations pourra être établi.

Nous constatons que les installations de 100 kW<sub>c</sub> permettent d'obtenir des temps de retour sur investissement plus courts dans les deux configurations étudiées. Le coût de l'installation étant le moins élevé des puissances installées, le retour sur investissement sera également moins élevé.

Enfin, la configuration qui apparait comme la plus avantageuse économiquement est l'autoconsommation avec revente de surplus sur le réseau.

## B. Production de chaleur avec des sources renouvelables

Cette partie s'intéresse aux solutions technologiques de production de chaleur renouvelable utilisable à l'échelle d'un foyer. C'est-à-dire une production de chauffage et une production d'eau chaude sanitaire (ECS).

### 1. Échelle individuelle

#### a. Hypothèses de l'étude

Dans cette étude, les besoins en chauffage et en ECS de deux foyers situés à Saint-Aunès (34 130) sont étudiés. Ces deux maisons ont une surface de 120 m<sup>2</sup> mais ont deux classes énergétiques différentes :

- Une maison classe énergétique E, très mal isolée avec une consommation de (250 kWh/m<sup>2</sup>/an)
- Une maison classe énergétique B, bien isolée avec une consommation de (80 kWh/m<sup>2</sup>/an)

Ces consommations ne correspondent qu'aux besoins en chauffage de l'habitation. C'est pourquoi il faut également déterminer les besoins en ECS.

L'objectif de l'étude est donc d'estimer les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire afin de dimensionner plusieurs systèmes qui réalisent ces fonctions. Ceci permettra de donner leur prix d'achat, leur coût d'installation, leur coût d'entretien et leur facture énergétique. De plus, grâce au revenu du foyer, les aides financières associées seront déterminées. L'objectif est de réaliser une étude sur 20 ans pour déterminer quelles technologies sont les plus avantageuses.

#### b. Hypothèse sur les aides financières

Le foyer étudié a un Revenu Fiscal de Référence (RFR) de 48 000€. Ce revenu correspond à la catégorie « violet » [54](Tableau 26). Ceci permet de déterminer les aides possibles pour l'installation des différentes technologies.

<b>Nombre de PERSONNES COMPOSANT LE MÉNAGE</b>	<b>Catégorie « Bleu »</b>	<b>Catégorie « Jaune »</b>	<b>Catégorie « Violet »</b>	<b>Catégorie « Rose »</b>
1	≤ 15 262 €	Entre 15 262 € et 19 565 €	Entre 19 565 € et 29 148 €	> 29 148 €
2	≤ 22 320 €	Entre 22 230 € et 28 614 €	Entre 28 614 € et 42 848 €	> 42 848 €
3	≤ 26 844 €	Entre 26 844 € et 34 411 €	Entre 34 411 € et 51 592 €	> 51 592 €
4	≤ 31 359 €	Entre 31 359 € et 40 201 €	Entre 40 201 € et 60 336 €	> 60 336 €
5	≤ 35 894 €	Entre 35 894 € et 46 015 €	Entre 46 015 € et 69 081 €	> 69 081 €
Par personne en plus	+ 4 526 €	+ 5 797 €	+ 8 744 €	+ 8 744 €

Tableau 26 : Plafond des ressources pour déterminer la catégorie de revenus

Les aides financières qui ont été prises en compte dans cette étude sont :

- Ma prime rénov ;
- Les certificats d'économies d'énergie « normaux » (CEE) ;
- Les certificats d'économies d'énergie « coup de pouce chauffage », uniquement lorsque que le système de chauffe mis en place vient remplacer une vieille chaudière (autre que condensation).

A noter que les CEE « normaux » et les CEE « coup de pouce chauffage » ne sont pas cumulables pour un même poste de travaux.

Néanmoins, les aides régionales, la TVA réduite et l'éco-prêt à taux zéro n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

A la fin de ce rapport, une partie est dédiée exclusivement à l'explication des aides financières.

### c. Hypothèses pour le coût des énergies

Afin d'obtenir une étude précise, le coût des énergies utilisées pour la réalisation des factures énergétiques sont ceux en vigueur au dernier trimestre de l'année 2022.

	<b>Coût des Energie (€/kWh)</b>	<b>Abonnement [€/an]</b>
<b>Électricité</b>	0,174	136,32
<b>Bois</b>	0,038	
<b>Gaz</b>	0,112	102,12
<b>Granulé</b>	0,094	
<b>Fioul</b>	0,156	

Tableau 27 : Coûts et abonnements des différents types d'énergie

Le Tableau 27 présente le coût des énergies utilisées pour l'étude ainsi que le tarif pour l'abonnement.

#### d. Hypothèses pour les besoins en chauffage

Afin de déterminer la puissance des systèmes de chauffage, il faut étudier la consommation énergétique annuelle des deux maisons. Pour ce faire, la consommation énergétique en chauffage des deux maisons a été utilisée ainsi que leur temps de chauffe annuel (environ 4 mois à pleine puissance pendant 12 heures par jour [55]). Au total, un temps de chauffe de 1440 heures est obtenu.

	<b>Très mal isolé (250 kWh/m<sup>2</sup>/an)</b>	<b>Bien isolé (80 kWh/m<sup>2</sup>/an)</b>
<b>Surface</b>	120 m <sup>2</sup>	
<b>Consommation énergétique annuelle</b>	30 000 kWh/an	9 600 kWh
<b>Puissance à installer [kW]</b>	<b>21</b>	<b>7</b>

*Tableau 28 : Puissance à installer dans les deux types d'habitation*

Le Tableau 28, présente les résultats des puissances de chauffe à installer dans les deux habitations.

Pour le foyer très mal isolé (250 kWh/m<sup>2</sup>/an), une puissance de chauffage de 21 kW est nécessaire alors que pour le foyer bien isolé (80 kWh/m<sup>2</sup>/an), une puissance de 7 kW est suffisante.

Les systèmes de chauffage étudiés dans cette étude seront :

- Une chaudière fioul classique ;
- Une chaudière gaz à condensation ;
- Un poêle à bûches ;
- Un poêle à granulés de bois ;
- Une pompe à chaleur géothermique (eau/eau) avec sondes verticales géothermiques ;
- Une pompe à chaleur géothermique (eau/eau) avec capteurs horizontaux ;
- Une pompe à chaleur air/air multisplit ;
- Une pompe à chaleur air/eau.

Les différents systèmes ci-dessus ont donc été dimensionnés en fonction de la puissance de chauffage nécessaire pour chauffer les deux types de foyer.

e. Coût des différents systèmes de chauffage

Dans cette partie, le coût des systèmes de chauffage est présenté avec la prise en compte du coût d'installation, de l'entretien annuel ainsi que le coût de la facture énergétique associée à chacun d'entre eux. Les aides financières pour chaque système sont également indiquées dans les tableaux.

- **La chaudière gaz à condensation**

Le Tableau 29 présente les paramètres de l'étude liés à l'installation d'une chaudière gaz-condensation pour les deux habitations étudiées :

	Très mal isolé	Bien isolé
	Chaudière gaz à condensation	Chaudière gaz à condensation murale
<b>Investissement [€]</b>	3 800	1 316
<b>Coût d'installation [€]</b>	1500	700
<b>Maintenance [€/an]</b>	100	
<b>Rendement</b>	0,95	
<b>Facture énergétique [€/an]</b>	3 639	1 234
<b>Ma prime Rénov [€]</b>	0	
<b>CEE "normaux" [€]</b>	141	

Tableau 29 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une chaudière gaz-condensation [56][57][58][59]

- **La chaudière au fioul**

Le Tableau 30 présente les paramètres de l'étude liés à l'installation d'une chaudière au fioul pour la maison très mal isolée. En effet, les chaudières au fioul qui sont aujourd'hui vendues ont de grosse puissance et c'est pourquoi une chaudière pour la maison bien isolée (7 kW) n'existe pas. La chaudière au fioul a donc été étudiée seulement pour la maison très mal isolée.

<b>Très mal isolé</b>	
<b>Chaudière au fioul</b>	
<b>Investissement [€]</b>	6 000
<b>Coût d'installation [€]</b>	1 500
<b>Maintenance [€/an]</b>	200
<b>Rendement</b>	0,9
<b>Facture énergétique [€/an]</b>	5 200
<b>Ma prime Rénov [€]</b>	0
<b>CEE "normaux" [€]</b>	0

Tableau 30 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une chaudière fioul [60][61]

- **Les convecteurs électriques**

Le Tableau 31 présente les paramètres de l'étude liés à l'installation de convecteurs électriques pour les deux habitations étudiées :

	<b>Très mal isolé</b>	<b>Bien isolé</b>
<b>Convecteur électrique</b>		
<b>Investissement [€]</b>	2 200	876
<b>Coût d'installation [€]</b>	1 700	680
<b>Maintenance [€/an]</b>		0
<b>Rendement</b>		1
<b>Facture énergétique [€/an]</b>	5 356	1 807
<b>Ma prime Rénov [€]</b>		0
<b>CEE "normaux" [€]</b>		50

Tableau 31 : Paramètres de l'étude liés à l'installation de convecteurs électriques [62][63]

- **Le poêle à granulé**

Le Tableau 32 présente les paramètres de l'études liées à l'installation de poêle à granulé pour les deux habitations étudiées :

	Très mal isolé	Bien isolé
<b>Poêle à granulé</b>		
<b>Investissement [€]</b>	5 000	1 500
<b>Coût d'installation [€]</b>	3 000	
<b>Maintenance [€/an]</b>	200	
<b>Rendement</b>	0,9	
<b>Facture énergétique [€/an]</b>	3 133	1 003
<b>Ma prime Rénov [€]</b>	2 100	
<b>CEE "normaux" [€]</b>	96	

Tableau 32 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'un poêle à granulé [64][65]

- **Le poêle à bûche**

Le Tableau 33 présente les paramètres de l'étude liés à l'installation d'un poêle à bûche. Pour ce système, un poêle à bûche de 7 kW sera étudié seulement. Dans le cas de la maison bien isolée (80 kWh/m<sup>2</sup>/an), ce dernier permettra de couvrir la totalité des besoins en chauffage de l'habitation. Néanmoins pour la maison très mal isolée (250 kWh/m<sup>2</sup>/an), il sera utilisé en appoint d'un autre système de chauffage.

<b>Très mal isolé / Bien isolé</b>	
<b>Poêle à bûche</b>	
<b>Investissement [€]</b>	843
<b>Coût d'installation [€]</b>	2 100
<b>Maintenance [€/an]</b>	80
<b>Rendement</b>	0,85
<b>Facture énergétique [€/an]</b>	1 341
<b>Ma prime Rénov [€]</b>	1 600
<b>CEE "normaux" [€]</b>	86

Tableau 33 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'un poêle à bûche [66][67]

- **La pompe à chaleur eau/eau**

Le Tableau 354 présente les paramètres de l'étude liés à l'installation d'une pompe à chaleur géothermique (eau/eau) pour les deux habitations étudiées. Deux systèmes de captages seront également étudiés, un sur sondes géothermiques verticales et un autre sur capteurs horizontaux.

	Très mal isolé	Bien isolé
<b>Pompe à chaleur eau/eau</b>		
<b>Investissement [€]</b>	20 000	12 700
<b>Maintenance [€/an]</b>	156	
<b>SCOP</b>	4	
<b>Facture énergétique [€/an]</b>	1441	554
<b>Ma prime Rénov [€]</b>	5 000	
<b>CEE « coup de pouce » [€]</b>	4 000	

Tableau 34 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une pompe à chaleur géothermique (eau/eau) [66][67]

Le Tableau 35 présente les paramètres de l'étude liés à l'installation du système de captage par sondes géothermiques verticales (SGV) pour les deux habitations.

	Très mal isolé	Bien isolé
<b>Dimensionnement sondes géothermiques verticales</b>		
<b>Puissance chauffage + ECS [kW]</b>	23,2	9,2
<b>Puissance récupérable sous-sol [W/ml]</b>	50	
<b>Longueur des sondes [ml]</b>	120	
<b>Coût complet<sup>2</sup> d'un forage sur SGV [€ HT/ml]</b>	75	
<b>Coût d'installation [€]</b>	34 800	13 800

Tableau 35 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'un système de captage par sondes géothermiques verticales [58]

---

<sup>2</sup> Le coût complet d'un forage comprend l'ensemble des postes de dépense d'un projet sur SGV. Il inclut notamment l'amenée et le repli du matériel de forage, le forage, la fourniture et la pose des sondes et de l'antigel, la cimentation, les tranchées et le raccordement à un collecteur.

Le Tableau 36 présente les paramètres de l'étude liés à l'installation du système de captage par capteurs horizontaux pour les deux habitations.

	Très mal isolé	Bien isolé
<b>Dimensionnement capteurs horizontaux</b>		
<b>Puissance chauffage + ECS [kW]</b>	23,2	9,2
<b>Puissance surfacique [W/m<sup>2</sup>]</b>	25	
<b>Surface nécessaire [m<sup>2</sup>]</b>	928	368
<b>Coût d'installation [€]</b>	14 500	5 620

Tableau 36 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'un système de captage par sondes géothermiques horizontaux [58]

- **La pompe à chaleur air/eau**

Le Tableau 37 présente les paramètres de l'étude liés à l'installation d'une pompe à chaleur air/eau pour les deux habitations. Dans le cas de l'habitation bien isolée (80 kWh/m<sup>2</sup>/an) la pompe à chaleur air/eau couvrira la totalité des besoins en chauffage, néanmoins dans le cas de l'habitation très mal isolée (250 kWh/m<sup>2</sup>/an), la pompe à chaleur air/eau ne couvrira qu'une partie des besoins et sera couplée à un système d'appoint. De plus, la pompe à chaleur air/eau ne couvrira que 70 % des besoins en ECS des deux habitations et sera suppléée par un système de résistance électrique pour couvrir les 30 % restants.

	Très mal isolé	Bien isolé
<b>Pompe à chaleur air/eau</b>		
<b>Investissement [€]</b>	15 905	10 000
<b>Coût d'installation [€]</b>	1 500	1 500
<b>Maintenance [€/an]</b>	156	
<b>COP</b>	4	
<b>Facture énergétique [€/an]</b>	1441	554
<b>Ma prime Rénov [€]</b>	3 000	
<b>CEE "normaux" [€]</b>	0	
<b>CEE « coup de pouce »</b>	4 000	

Tableau 37 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une pompe à chaleur air/eau [66][67]

- **La pompe à chaleur air/air**

Le Tableau 38 présente les paramètres de l'étude liés à l'installation d'une pompe à chaleur air/air multisplit pour les deux habitations étudiées. Dans le cas de l'habitation bien isolée (80

kWh/m<sup>2</sup>/an) la pompe à chaleur air/eau couvrira la totalité des besoins en chauffage, néanmoins dans le cas de la maison très mal isolée (250 kWh/m<sup>2</sup>/an), la pompe à chaleur air/eau ne couvrira qu'une partie des besoins et sera couplée à un système d'appoint.

	Très mal isolé	Bien isolé
	Pompe à chaleur air/air (14kw)	Pompe à chaleur air/air
<b>Investissement [€]</b>	10200	4675
<b>Coût d'installation [€]</b>	1500	
<b>Maintenance [€/an]</b>	156	
<b>COP</b>	4	
<b>Facture énergétique [€/an]</b>	1441	554
<b>Ma prime Rénov [€]</b>	0	
<b>CEE "normaux" [€]</b>	216	

Tableau 38 : Paramètres de l'étude liés à l'installation d'une pompe à chaleur air/air [68][69]

#### f. Hypothèses et coûts des besoins en eau chaude sanitaire

Afin de déterminer les besoins en Eau Chaude Sanitaire (ECS) dans les deux foyers, la quantité d'eau moyenne utilisée en France par personne a été identifiée, soit environ 50 L/jour. De ce fait, pour un foyer de 4 personnes, un ballon de 200 L est donc nécessaire.

Ensuite, la quantité d'énergie qu'il faut pour chauffer l'eau de ce ballon à 60°C a été estimée, soit environ 4160 kWh. Ces différentes valeurs ont permis de dimensionner trois systèmes pour répondre au besoin d'eau chaude sanitaire pour un foyer :

- Un chauffe-eau électrique ;
- Un chauffe-eau thermodynamique ;
- Des panneaux solaires thermiques.

Pour chacun des systèmes, l'investissement, le coût d'installation, l'entretien, le rendement ou le Coefficient de Performance (COP) et la facture énergétique ont été déterminés.

	Chauffe-eau électrique	Chauffe-eau thermodynamique	Panneau solaire thermique avec appoint de résistance
<b>Investissement [€]</b>	400	1 500	5 000
<b>Coût d'installation [€]</b>	430	1 000	
<b>Entretien [€/an]</b>	150	150	100
<b>Rendement / COP</b>	0,7	3,19	0,4
<b>Facture énergétique [€/an]</b>	1029	224	360
<b>Ma prime Rénov [€]</b>	0	400	2000
<b>CEE "normaux" [€]</b>	0	90	137

Tableau 39 : Paramètres de l'étude liés à l'installation de chauffe-eau électrique, thermodynamique et de panneau solaire thermique [70][71][72]

Dans la suite de l'étude, l'objectif est donc de réutiliser les différents éléments du Tableau 39 et de déterminer quelles technologies est la plus avantageuse sur une période de 20 ans. Ces technologies seront couplées aux systèmes de chauffage étudiés dans la partie précédente.

#### g. Synthèse des taux de couvertures des systèmes

Le taux de couverture représente la part des besoins, que ce soit en chauffage ou en ECS, couvert par le système mis en place. Il varie suivant chacun d'entre eux. Le Tableau 40 présente les taux de couvertures utilisés dans l'étude pour les deux habitations.

Taux de couverture				
	Très mal isolé		Bien isolé	
	Chauffage	ECS	Chauffage	ECS
<b>Chaudière gaz à condensation</b>	100%	100%	100%	100%
<b>PAC eau/eau</b>	100%	100%	100%	100%
<b>Poêle à granulé</b>	33%	0%	100%	0%
<b>Poêle à bois classique</b>	33%	0%	100%	0%
<b>Convecteur électrique</b>	100%	0%	100%	0%
<b>PAC air/eau</b>	80%	70%	100%	70%
<b>PAC air/air</b>	67%	0%	100%	0%
<b>Chauffe-eau électrique</b>	0%	100%	0%	100%
<b>Chauffe-eau thermodynamique</b>		65%		65%
<b>Panneaux solaires thermiques</b>				

Tableau 40 : Taux de couverture de chauffage et d'ECS pour les différents types de technologies

Lorsque les besoins en chauffage ou en ECS ne sont pas à 100%, cela signifie qu'il faut rajouter un appoint, c'est-à-dire une technologie qui vient en complément d'un autre système.

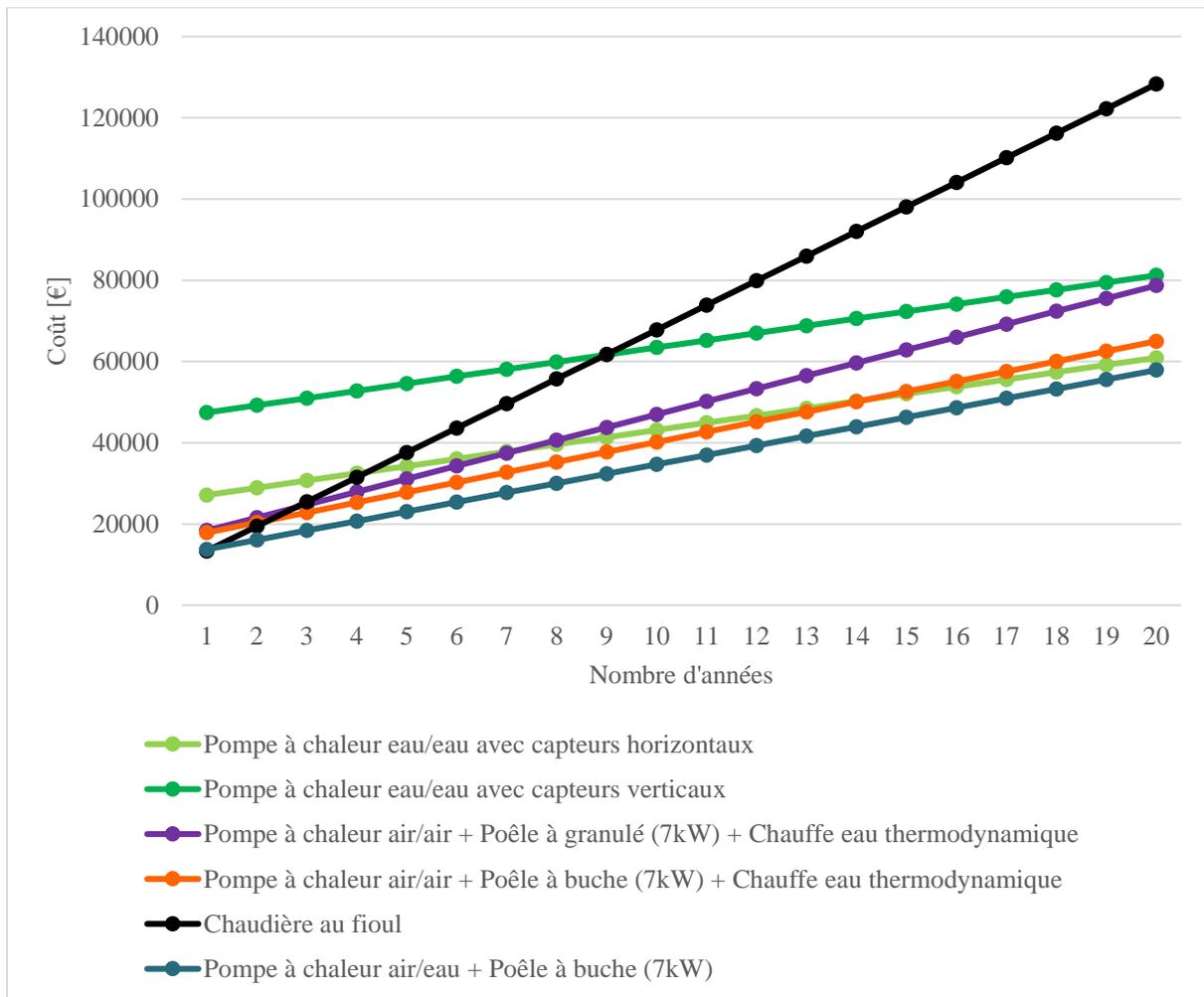
#### h. Résultats de l'étude pour la maison très mal isolée

Maintenant que le coût global annuel de chaque système énergétique est déterminé, nous pouvons les cumuler pour réaliser une étude comparative sur 20 ans. Cette étude a pour objectif de mettre en valeur le système énergétique le plus économique au bout de la 20<sup>ème</sup> année.

Pour ce faire, différentes analyses comparatives vont être réalisées avec pour chacune, un système initial de production de chaleur et d'ECS utilisant une énergie non-renouvelable.

i. Cas du remplacement d'une chaudière fioul  
« classique »

Le Graphique 4 présente l'étude comparative du remplacement d'une chaudière fioul classique.



Graphique 4 : Étude comparative du remplacement d'une chaudière fioul

A noter que les PAC eau/eau et air/eau bénéficient de la prime CEE « coup de pouce » car nous sommes dans le cas du remplacement d'une vieille chaudière qui n'est pas à condensation.

Nous constatons que le système énergétique le plus coûteux au bout de 20 ans est la chaudière au fioul, avec un coût supérieur à 120 000 €. Alors que le système énergétique le plus économique est la PAC air/eau couplée à un poêle à bûche pour couvrir les besoins en

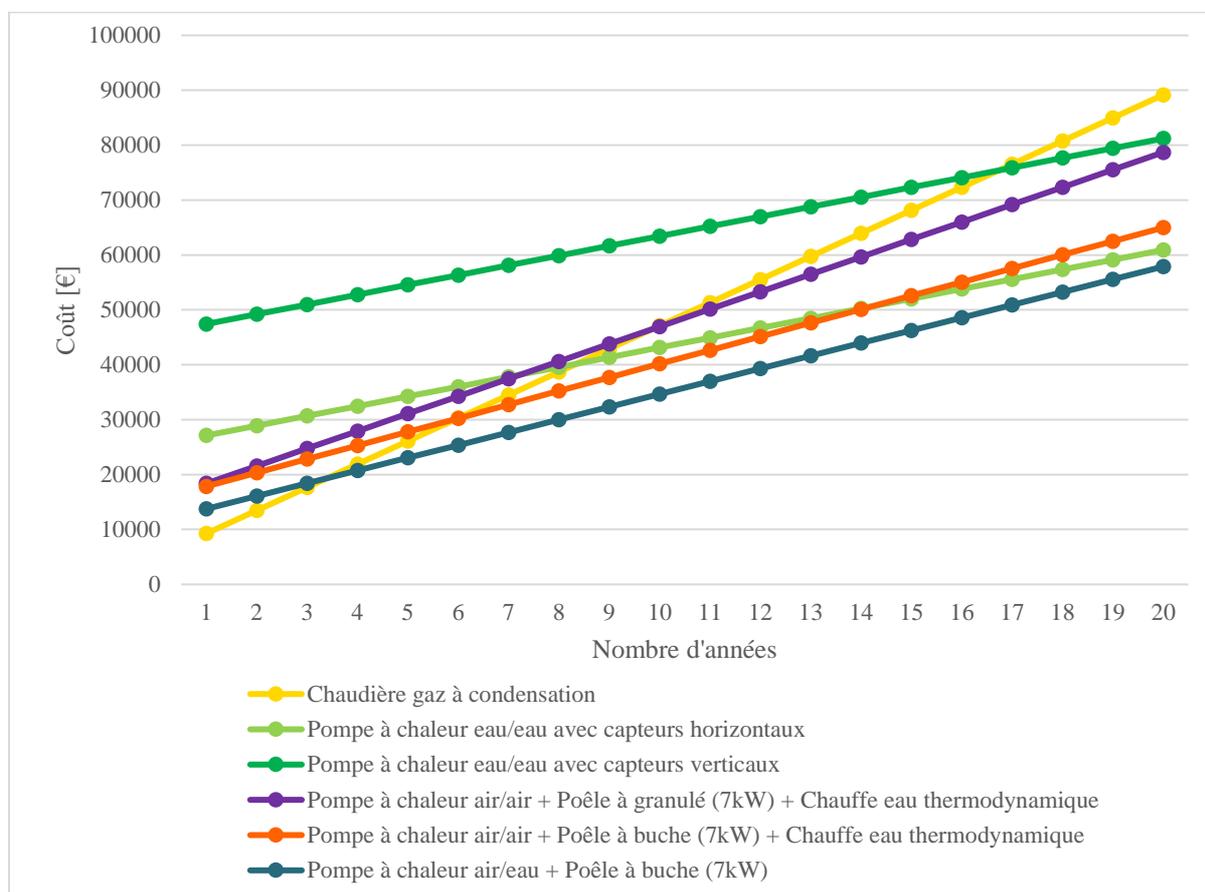
chauffage et en ECS, avec un coût d'environ 58 000 €. A noter que pour cette solution l'appoint électrique pour couvrir la totalité des besoins en ECS a été pris en compte.

Les solutions géothermiques deviennent plus compétitives, entre la 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> année pour les capteurs horizontaux et entre le 9<sup>ème</sup> et la 10<sup>ème</sup> année pour les capteurs verticaux. Toutefois, l'aspect économique n'est pas le seul facteur à étudier pour la réalisation d'un projet de géothermie. En effet, les capteurs horizontaux nécessitent un terrain de taille suffisante et non recouvert d'un revêtement étanche.

Nous remarquons que les solutions avec des pompe à chaleur air/air deviennent plus compétitives entre la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> année par rapport à une chaudière fioul classique. Néanmoins la solution PAC air/air couplée à un poêle à bûche est plus avantageuse que la solution PAC air/air couplée à un poêle à granulé à cause du coût de l'énergie associée. En effet, les granulés de bois ont un coût supérieur aux bûches traditionnelles, en €/kWh d'énergie produite.

#### ii. Cas du remplacement d'une chaudière gaz à condensation

Le Graphique 5 présente l'étude comparative du remplacement d'une chaudière gaz à condensation.



Graphique 5 : Étude comparative du remplacement d'une chaudière gaz-condensation

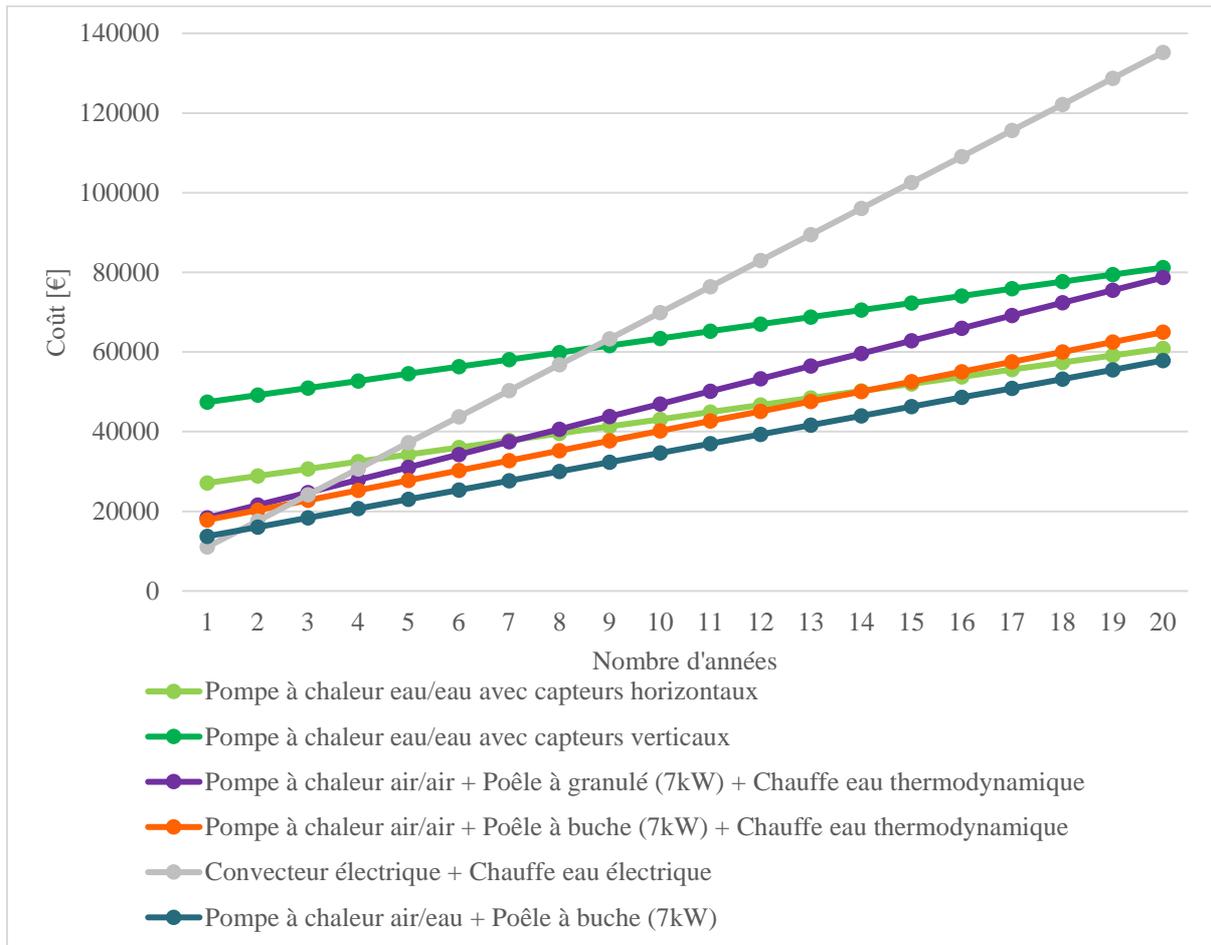
Nous constatons que le système énergétique le plus coûteux au bout de 20 ans est la chaudière gaz à condensation, avec un coût d'environ 90 000€. Même si l'investissement pour un tel système n'est pas le plus élevé, le prix du gaz défavorise largement cette technologie.

Les solutions géothermiques deviennent plus compétitives, entre la 8<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> année pour les capteurs horizontaux et entre le 16<sup>ème</sup> et la 17<sup>ème</sup> année pour le captage sur sondes géothermiques verticales. Toutefois, l'aspect économique n'est pas le seul facteur à étudier pour la réalisation d'un projet de géothermie. En effet, les capteurs horizontaux nécessitent un terrain de taille suffisante et non recouvert d'un revêtement étanche.

Enfin, la pompe à chaleur air/air couplée à un poêle à bûches et un chauffe-eau thermodynamique devient la méthode la plus compétitive entre la 6<sup>ème</sup> et la 7<sup>ème</sup> année par rapport à la solution chaudière gaz. Alors que le pompe à chaleur air/air couplée à un poêle à granulé et à un chauffe-eau thermodynamique devient une solution plus compétitive que la chaudière gaz à condensation entre la 10<sup>ème</sup> et la 11<sup>ème</sup> année.

### iii. Cas du remplacement de convecteurs électriques et d'un chauffe-eau électrique

Le Graphique 6 présente le cas du remplacement d'un système tout électrique : convecteurs couplés à un chauffe-eau électrique pour couvrir les besoins de l'habitation.



Graphique 6 : Étude comparative du remplacement de convecteurs électriques

Nous remarquons que la solution du tout électrique : convecteurs couplés à un chauffe-eau électrique est la solution la plus coûteuse sur 20 ans, avec un coût de 135 000 €.

Les solutions géothermiques deviennent plus compétitives, entre la 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> année pour les capteurs horizontaux et entre le 8<sup>ème</sup> et la 9<sup>ème</sup> année pour le captage sur sondes géothermiques verticales.

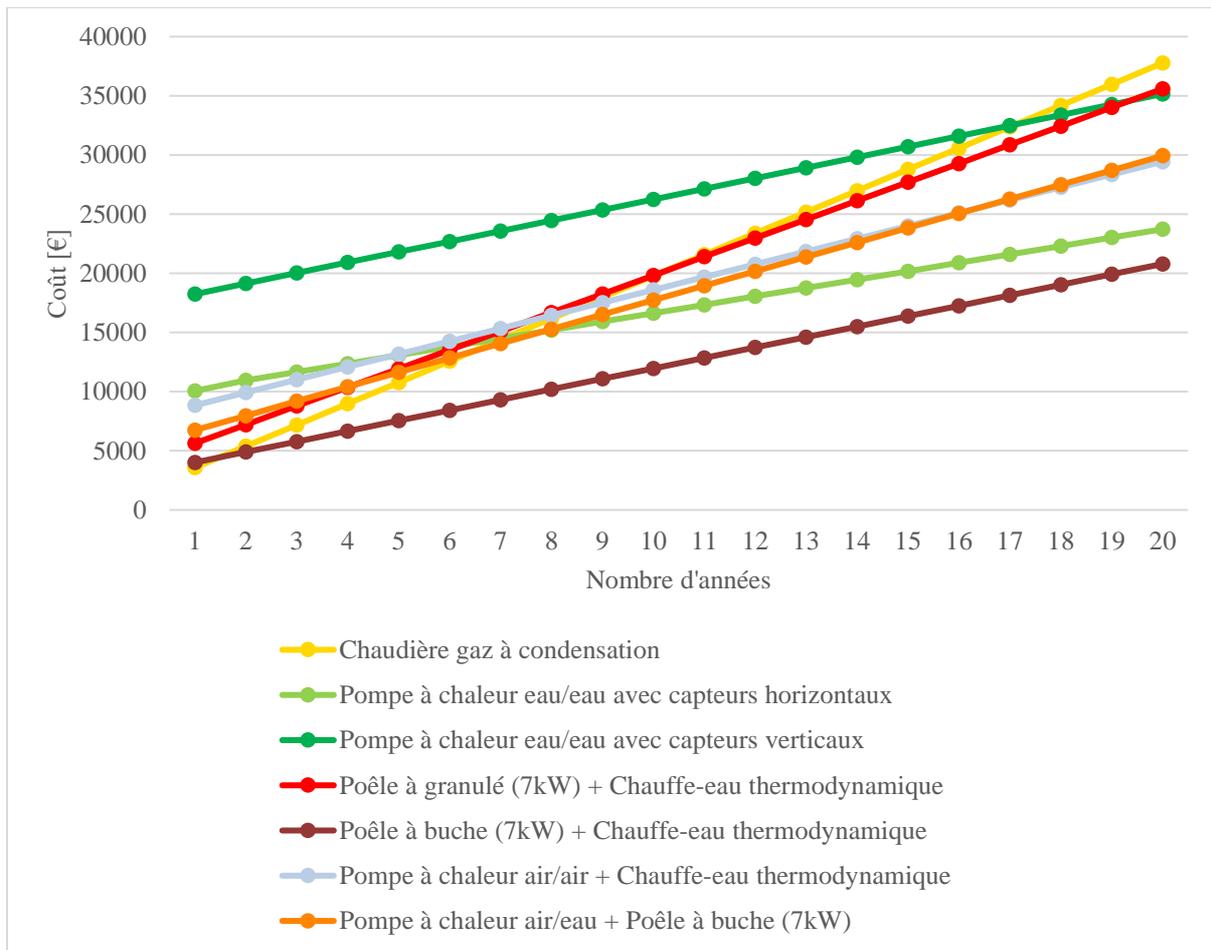
De plus, les solutions avec des pompes à chaleur air/air, deviennent plus économiques que le tout électrique à partir de la 3<sup>ème</sup> année, alors que la pompe à chaleur air/eau couplée à un poêle à bûche est plus avantageuse dès la deuxième année.

## f. Résultats de l'étude pour la maison bien isolé

Cette partie de l'étude se focalise sur le cas de l'habitation bien isolée pour déterminer quel système de chauffage et de production d'ECS est le plus avantageux au bout de 20 ans.

### i. Cas du remplacement d'une chaudière gaz à condensation

Le Graphique 7 présente le cas du remplacement d'une chaudière gaz à condensation.



Graphique 7 : Étude comparative du remplacement d'une chaudière gaz-condensation

Nous constatons que le système énergétique le plus coûteux au bout de 20 ans est la chaudière gaz à condensation, avec un coût d'environ 38 000 €. Alors que le système énergétique le plus économique est le poêle à bûches couplé à un chauffe-eau thermodynamique pour couvrir les besoins en eau chaude sanitaire, avec un coût d'environ 21 000 €.

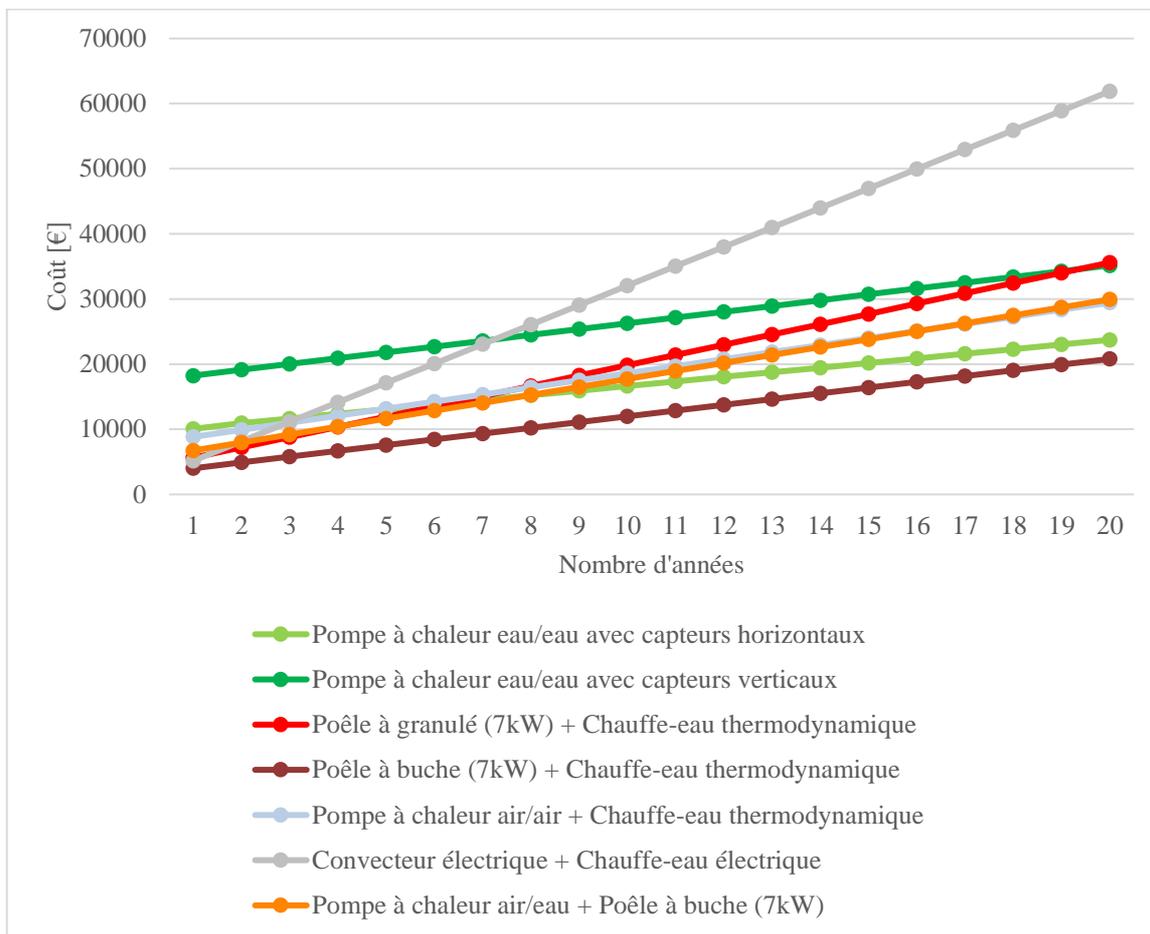
Les solutions géothermiques deviennent plus compétitives, entre la 7<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> année pour les capteurs horizontaux et entre le 16<sup>ème</sup> et la 17<sup>ème</sup> année pour le captage sur sondes géothermiques verticales.

De plus, le poêle à granulés couplé à un chauffe-eau thermodynamique est la deuxième solution la plus coûteuse à cause de coût élevé des granulés de bois. Néanmoins cette solution devient plus compétitive que la chaudière gaz à condensation entre la 10<sup>ème</sup> et la 11<sup>ème</sup> année.

Enfin, la pompe à chaleur air/eau couplée à un poêle à bûches devient plus avantageuse à partir de la 7<sup>ème</sup> année face à la chaudière à condensation, alors que la solution de la pompe à chaleur air/air couplée à un chauffe-eau thermodynamique devient plus compétitive à partir de la 9<sup>ème</sup> année.

#### ii. Cas du remplacement de convecteurs électriques

Le Graphique 8 présente le cas du remplacement d'un système tout électrique : convecteurs couplés à un chauffe-eau électrique pour produire l'eau chaude sanitaire.



Graphique 8 : Étude comparative du remplacement de convecteurs électriques

Nous remarquons que, comme pour la maison très mal isolée, la solution du tout électrique est la plus coûteuse sur 20 ans, avec un coût de d'environ 62 000 €.

Les solutions géothermiques deviennent plus compétitives, entre la 3<sup>ème</sup> et la 4<sup>ème</sup> année pour les capteurs horizontaux et entre la 7<sup>ème</sup> et la 8<sup>ème</sup> année pour le captage sur sondes géothermiques verticales.

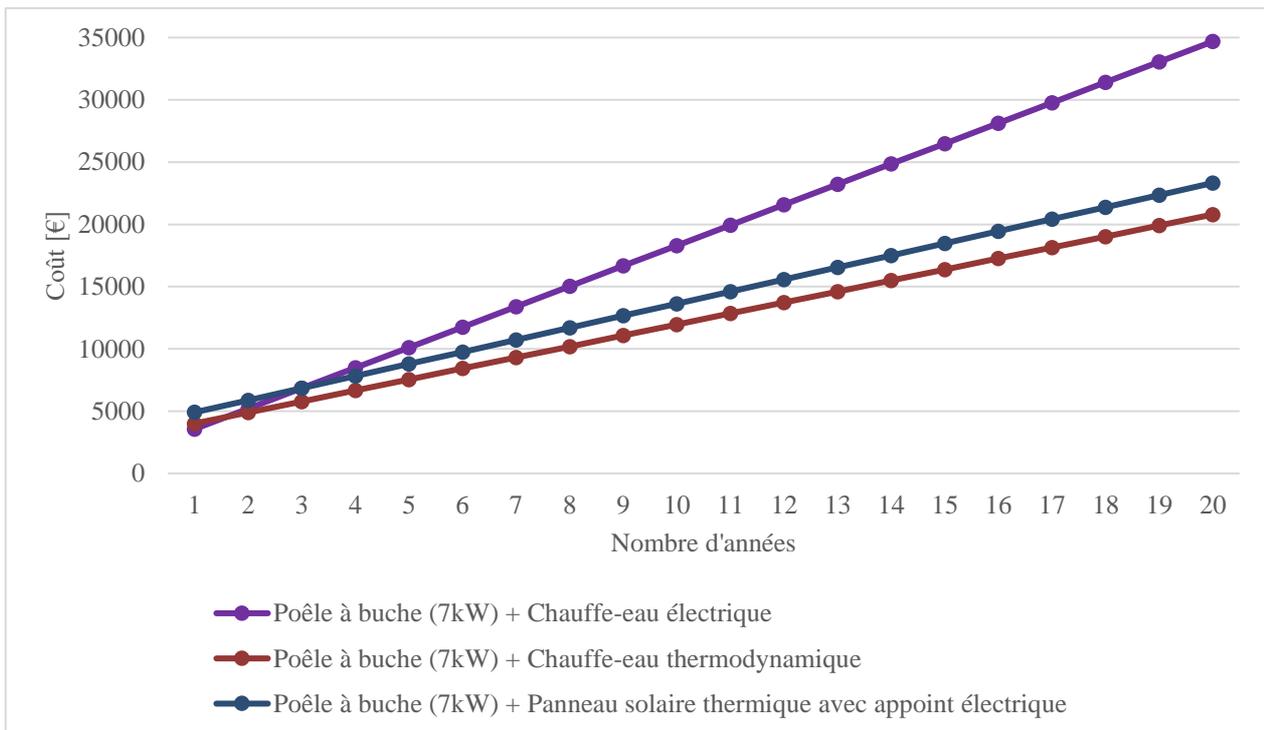
Quant à la solution pompe à chaleur air/eau couplée à un poêle à bûches, elle devient plus avantageuse dès la 2<sup>ème</sup> année face au tout électrique.

Même si l'investissement pour un poêle à granulés de bois couplé à un chauffe-eau thermodynamique est très légèrement supérieur au système tout électrique, cette solution devient plus compétitive dès la 2<sup>ème</sup> année.

Enfin, la solution de la pompe à chaleur air/air couplée à un chauffe-eau thermodynamique devient plus compétitive que le tout électrique entre la 3<sup>ème</sup> et la 4<sup>ème</sup> année, pour atteindre un coût final sur 2 ans équivalent à la solution pompe à chaleur air/eau couplée à un poêle à bûches.

### iii. Comparaison des systèmes de production ECS

Le Graphique 9 présente l'étude des solutions de production d'ECS pour la maison bien isolée. Le système de chauffage choisi pour cette comparaison est le poêle à bûches, car c'est ce dernier qui est le plus économique.



Graphique 9 : Étude comparative des technologies de production d'ECS

Nous remarquons que pour des coûts d'investissement très proches, le chauffe-eau électrique est la solution de production d'ECS la plus coûteuse au bout de 20 ans.

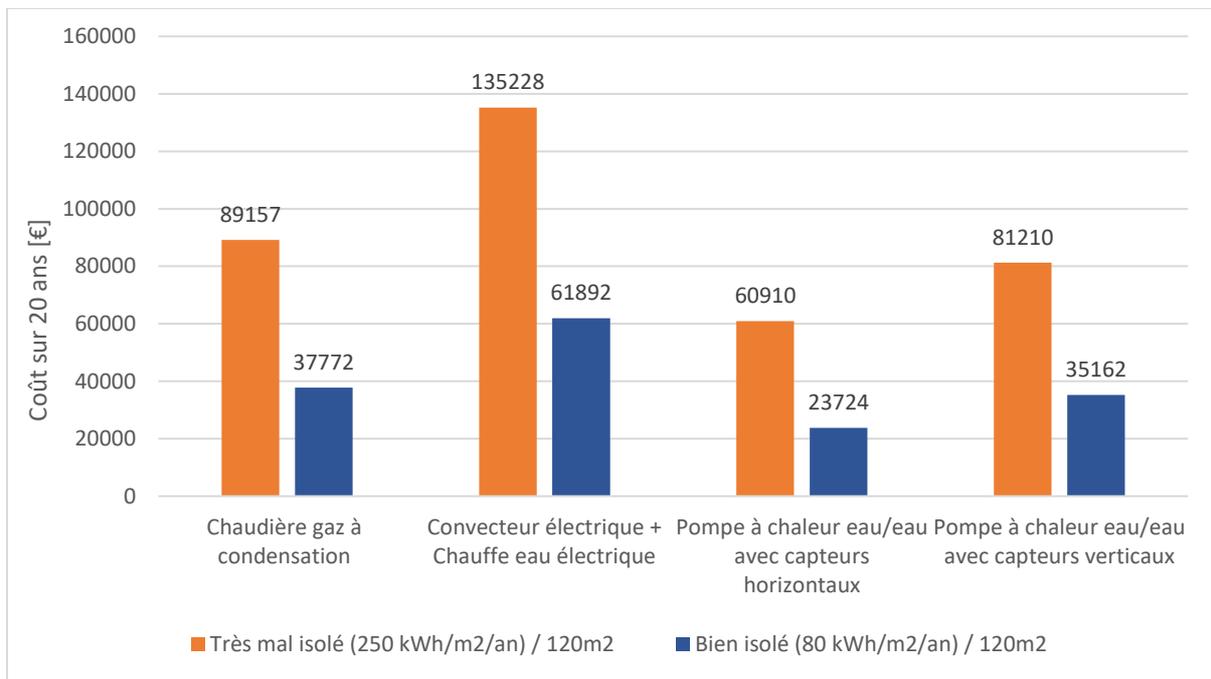
Le chauffe-eau thermodynamique devient plus compétitif à partir de la 2<sup>ème</sup> année alors que le panneau solaire thermique avec résistance électrique est plus avantageux à partir de la 3<sup>ème</sup> année face au chauffe-eau électrique.

Finalement, la solution la plus économique sur 20 ans est le chauffe-eau thermodynamique, grâce à son coefficient de performance élevé (environ 3). Le panneau solaire thermique reste également très compétitif, néanmoins ce dernier ne couvre que 65% des besoins en ECS, les

35 % supplémentaire sont produits par un appoint électrique, c'est pourquoi il se voit légèrement défavorisé face au chauffe-eau thermodynamique.

### i. Comparaison des maisons bien isolé et très mal isolé

Dans cette partie de l'étude, l'objectif est de comparer la facture énergétique d'une maison bien isolée à celle d'une maison très mal isolée (une étiquette énergétique E contre une B). Le Graphique 10 présente le comparatif des factures énergétiques sur 20 ans pour différents systèmes. Seuls les systèmes identiques pour les deux habitations ont été comparés.



Graphique 10 : Comparaison des factures énergétiques pour les deux types de maison pour une PAC géothermique

Nous remarquons que l'écart le plus conséquent est sur le système tout électrique, convecteur plus chauffe-eau électrique. Ceci s'explique par la grande dépendance du coût de cette technologie à son utilisation. Autrement dit, la facture énergétique pour cette technologie n'est dépendante que du coût à l'usage car son coût à l'achat est négligeable.

Le Graphique 10 démontre également l'importance fondamentale de l'isolation dans une habitation si l'on souhaite réduire sa facture énergétique.

## 2. Échelle collective

Après avoir réalisé l'étude de cas à l'échelle individuelle pour le chauffage et la production d'ECS, il faut maintenant réaliser cette étude à l'échelle collective, celle de la commune.

Cependant, la production de chauffage nécessite l'installation d'une centrale conséquente, ce qui implique un coût d'investissement important. Parmi ces installations, on peut retrouver les chaufferies biomasse et les installations géothermiques collectives.

De plus, l'installation d'une technologie de production de chaleur nécessite l'installation d'un réseau de chaleur dans toute la commune afin de redistribuer la production aux habitations.

La production de chaleur à l'échelle collective grâce à des sources renouvelables sur la commune implique donc des coûts d'investissement trop conséquents. Cette solution n'apparaît donc pas comme judicieuse sur la commune de Saint-Aunès pour du bâti déjà existant.

## IV. Financement possible

Dans cette partie, nous allons aborder les différentes aides financières qui existent. Ces aides peuvent concerner une grande variété de projets (isolation, changement d'équipement de chauffage, ...) et visent à encourager les travaux qui permettent une baisse des émissions de gaz à effet de serre. Le but de cette partie n'est pas de proposer un guide pour la préparation de travaux mais plutôt de dresser un inventaire des aides disponibles au moment où nous rédigeons ce document. Si vous souhaitez vous engager dans des travaux de rénovation ou faire un investissement d'amélioration énergétique sur votre logement, nous vous conseillons de vous faire accompagner ; les dispositifs évoluent vite et un accompagnement personnalisé est le meilleur moyen de s'assurer que tout se déroule comme prévu. Pour cela, il existe différentes structures : l'Agence Locale de l'Énergie et du Climat (ALEC), l'Agence Régionale Énergie Climat (AREC), France Rénov', les bureaux d'études, Rénov'Occitanie, ... Ces entités ne proposent pas exactement le même service et certaines le fournissent même gratuitement. Néanmoins, ces aides sont soumises à différentes conditions, certaines dépendent aussi du niveau de revenus, d'autres changent en fonction du statut du propriétaire selon s'il est occupant ou bailleur, d'autres encore sont conditionnées au gain énergétique estimé, ... Il est donc impossible pour nous de faire du cas par cas, nous resterons donc sur une approche globale des différents dispositifs d'aides au financement des projets d'amélioration énergétique.

### A. Les aides locales

Commençons par la présentation des aides locales. Il est en effet possible de demander un soutien financier aux différentes échelles des collectivités territoriales. Pour un logement, la collectivité la plus proche est la commune, cependant la mairie de Saint-Aunès ne semble pas en mesure d'avoir un fond consacré à la rénovation énergétique.

Il y a ensuite l'échelle des Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) et Saint-Aunès appartient à la communauté d'agglomération du Pays de l'Or. D'après son Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET), la communauté d'agglomération du Pays de l'Or s'était engagée à aider une soixantaine de logements chaque année entre 2019 et 2022 et devait renouveler cet accompagnement jusqu'en 2025. Un budget est alloué chaque année afin de fournir une subvention à ceux qui le demandent, en 2020 il y a eu 53 bénéficiaires. Ce dispositif s'inscrit dans le cadre d'une politique départementale de Plan d'Intérêt Général (PIG) portée

par le conseil départemental de l'Hérault et qui est signée par l'Agence national de l'habitat (Anah), l'État, ainsi que plusieurs communautés de communes.

Nous passons donc à l'échelle départementale et l'Hérault dispose de plusieurs moyens pour encourager les investissements en faveur de la transition énergétique. D'abord, on trouve le syndicat Hérault Énergies qui aide les collectivités territoriales, les habitants de ces territoires ne sont donc pas directement concernés mais cela peut être bénéfique pour eux de façon indirecte et peut aussi leur donner envie d'investir eux-mêmes. Le dispositif Hérault Rénov' prévoit qu'une aide soit accessible aux résidents du département qui souhaitent faire des travaux d'amélioration énergétique.

Néanmoins, c'est la région qui dispose du plus de moyens pour aider à ces travaux via Rénov'Occitanie. C'est l'association Gefosat, située à Montpellier, qui est le guichet de Rénov'Occitanie en charge de la communauté d'agglomération du Pays de l'Or, et donc de la commune de Saint-Aunès. Ils proposent en premier lieu une consultation de conseil qui est gratuite. Il est ensuite possible de poursuivre sur un contrat payant, il y a deux formules, la première vise à définir le projet et comprend notamment un audit énergétique, la remise d'un rapport décrivant des scénarios d'amélioration et l'établissement d'un plan de financement. Tandis que la seconde est un accompagnement aux travaux dans lequel est inclus de l'analyse de devis, de l'aide à la rédaction des dossiers de demande d'aides, de l'assistance à maîtrise d'ouvrage et un suivi des consommations. Pour les aides financières, la région propose : le prêt Rénov'Occitanie, la caisse d'avance Rénov'Occitanie et l'écochèque logement. Le prêt Rénov'Occitanie est un crédit à taux fixe plafonné à 75 000 €, il vise à étaler les dépenses liées à des travaux d'amélioration énergétique et peut aussi inclure l'accompagnement Rénov'Occitanie décrit plus haut. La caisse d'avance Rénov'Occitanie permet d'éviter, aux ménages les plus modestes, d'avoir à faire eux-mêmes l'avance de tout ou une partie des frais des travaux. Enfin, l'écochèque logement est une aide de la région d'un montant de 1500 €, accessible sous différentes conditions : catégorie de revenus bleue ou jaune suivant le barème qui cadre Ma Prime Rénov', atteindre un certain niveau d'économie d'énergie primaire et être accompagné par Rénov'Occitanie.

## B. Les aides nationales

Pour ce qui est de l'échelle nationale, on y trouve les aides les plus connues. L'Anah dispense Ma Prime Rénov' et ses dérivées (Ma Prime Rénov' Sérénité et Ma Prime Rénov' Copropriété)

ainsi que Loc'Avantages pour les propriétaires qui veulent mettre un bien en location. Loc'Avantages est à la fois un dispositif qui permet d'obtenir une réduction d'impôt si on loue sous certaines conditions mais surtout une aide financière couvrant 25 % du montant total hors taxe des travaux. Ces derniers devront être faits avant la mise en location du logement et lui permettre d'atteindre au moins l'étiquette énergie D. Ma Prime Rénov' est, elle, l'aide principale distribuée pour de la rénovation énergétique. Il est possible de l'obtenir (sous différentes conditions) qu'on soit propriétaire occupant, propriétaire bailleur ou un syndicat de copropriétaires qui veut rénover les parties communes. Son montant est fonction de la nature des travaux, du gain énergétique qu'ils vont permettre, de la situation géographique du logement mais surtout des revenus du propriétaire. (Tableau 41)

**Déterminez votre catégorie en fonction de votre revenu fiscal de référence (RFR)  
Plafonds de revenus "Autres Régions que Ile de France" (en €)**

Nombre de personnes composant le ménage	Très Modestes	Modestes	Intermédiaires	Supérieures
1	15 262	19 565	29 148	> 29 148
2	22 320	28 614	42 848	> 42 848
3	26 844	34 411	51 592	> 51 592
4	31 359	40 201	60 336	> 60 336
5	35 894	46 015	69 081	> 69 081
Par personne supplémentaire	+ 4 526	+ 5 797	+ 8 744	+ 8 744

*Tableau 41 : Catégories de revenus déterminées par le revenu fiscal de référence*

Il y a donc 4 couleurs pour classer le niveau de revenus : bleu, jaune, violet et rose du plus modeste au plus aisé. Ma Prime Rénov' doit toujours être demandée avant de signer le devis des travaux (c'est le cas de la majorité des aides) et ils doivent être entrepris par des professionnels Reconnus Garants de l'Environnement (RGE). Il y a également plusieurs bonus (variables selon la catégorie de revenus) qui peuvent augmenter le montant de Ma Prime Rénov' : un forfait pour la réalisation d'un audit énergétique, un forfait rénovation globale pour les 2 catégories les plus aisées, un forfait assistance à maîtrise d'ouvrage, un bonus si le logement quitte l'étiquette énergétique de « passoire thermique » et un bonus s'il atteint le label Bâtiment Basse Consommation (BBC). La variante Ma Prime Rénov' Sérénité est réservée aux 2 catégories de revenus les plus modestes, s'ils envisagent des travaux de rénovation globale permettant d'obtenir un gain énergétique d'au moins 35 %. Enfin, Ma Prime Rénov'

Copropriété peut bénéficier aux différents copropriétaires qui entreprendraient des travaux d'amélioration des performances énergétiques.

L'autre aide majeure qui existe à l'échelle du pays provient des Certificats d'Économie d'Énergie (CEE), ce sont des aides que peuvent proposer les fournisseurs d'énergie. On les désigne aussi comme des « obligés » car l'État les oblige à encourager les économies d'énergie et il s'agit d'un moyen que certains fournisseurs d'énergie choisissent pour s'acquitter de cette obligation. Leur montant est très variable et ils peuvent concerner une grande variété de travaux. Ils sont répartis en 4 catégories : CEE standards, Coup de pouce Chauffage et Coup de pouce rénovation performante d'une maison individuelle ou d'un bâtiment résidentiel collectif. Les CEE standards sont accessibles pour une liste précise de travaux, l'inconvénient de ce type d'aide est qu'il est nécessaire de comparer autant d'« obligés » que possible afin d'obtenir l'offre la plus avantageuse. Cette aide peut d'ailleurs prendre différentes formes : bon d'achat, prime, réduction, ... La prime Coup de pouce Chauffage est plus cadrée puisqu'elle ne concerne que le remplacement d'une chaudière au fioul, au gaz ou au charbon par un équipement plus écologique parmi cette liste : chaudière biomasse performante, pompe à chaleur (air/eau, eau/eau ou hybride), système solaire combiné, raccordement à un réseau de chaleur alimenté par des énergies renouvelables ou chauffage au bois très performant. Enfin, le Coup de pouce rénovation performante est accessible pour une copropriété ou pour les maisons individuelles. Pour l'obtenir il faut atteindre un certain palier d'économie d'énergie primaire et cela implique de faire réaliser un audit énergétique. A nouveau, les montants sont variables et conditionnés au niveau de revenus.

Il existe encore 2 aides qui sont mises en place par l'État, d'abord la TVA réduite et ensuite l'éco-prêt à taux zéro. La TVA est abaissée à 5,5 % sur des matériaux, des équipements et une grande gamme de travaux de rénovation énergétique. Ils peuvent viser une baisse de la consommation d'énergie, être des travaux d'isolation thermique ou des travaux liés à la mise en place d'un système exploitant une source renouvelable d'énergie. Il y a quelques exceptions à ces principes généraux : certains équipements de chauffage, de climatisation ou de production d'énergie à partir d'une source renouvelable profitent d'un taux de TVA réduit à seulement 10 % ; c'est notamment le cas des panneaux solaires, des éoliennes domestiques ou des pompes à chaleur air/air [73] [74].

Pour ce qui est de l'éco-prêt à taux zéro, il s'agit d'un prêt sans intérêts plafonné à 50 000 €. Il est proposé par certaines banques qui ont signé une convention avec l'État pour financer des travaux réalisés par une entreprise RGE sur un logement qui a plus de 2 ans. Ce prêt peut aider

pour des travaux de rénovation ponctuelle, de rénovation globale visant un certain niveau de performance énergétique ou pour réhabiliter une installation d'assainissement non collectif grâce à un dispositif ne consommant pas d'énergie.

Il y a donc un grand nombre d'aides, cela justifie aussi la nécessité d'avoir recours à un conseil avant d'entamer les démarches pour effectuer des travaux de rénovation ou l'acquisition de dispositifs de production d'énergie issue d'une source renouvelable. La plupart de ces aides sont cumulables sous certaines conditions. En règle générale, il est toujours possible d'avoir un CEE, une version de Ma Prime Rénov', la TVA réduite et l'éco-prêt à taux zéro. A cela peuvent s'ajouter les aides locales (communauté d'agglomération, département et région) en fonction de leurs conditions d'obtentions [75][76][77][78][79][80].

### C. Précisions sur quelques technologies importantes

Maintenant que les différentes aides ont été présentées, nous allons revenir sur les technologies d'exploitation de sources d'énergie renouvelables et citer les aides auxquelles il est possible de prétendre pour chacune d'entre elles [81]. (Tableau 42)

	Éolienne individuelle	Solaire thermique	Solaire photovoltaïque	Solaire hybride	Géothermie	Bois énergie
<b>TVA réduite</b>						
<b>CEE</b>						
<b>Ma Prime Rénov'</b>						
<b>Eco-prêt taux zéro</b>						
<b>Subventions aggro, département et Rénov'Occitanie</b>	Concernent plutôt une augmentation globale de la performance énergétique					

Tableau 42 : Cumul des aides pour les technologies exploitant des sources renouvelables d'énergie

Pour aller dans le détail, le solaire photovoltaïque peut aussi prétendre à d'autres dispositifs d'encouragement que sont l'Obligation d'Achat (OA) et la prime à l'autoconsommation. L'obligation d'achat est mise en place par l'État et oblige EDF à racheter les kWh produits par une installation photovoltaïque à un tarif avantageux pour le producteur et qui est fixé par l'État. Les derniers tarifs connus sont ceux du 3<sup>ème</sup> trimestre de 2022. Le producteur signe alors un contrat pour une durée de 20 ans avec l'acheteur. (Tableau 43)

<b>Puissance de l'installation</b>	<b>≤ 3kWc</b>	<b>Entre 3 et 9 kWc</b>	<b>Entre 9 et 36 kWc</b>	<b>Entre 36 et 100 kWc</b>
<b>Revente totale</b>	20,22	17,18	12,31	10,70
<b>Revente de surplus</b>	10	10	6	6

*Tableau 43 : Tarifs (en centimes d'€ par kWh) de revente à EDF OA des kWh d'électricité produits par une installation photovoltaïque [82]*

Quant à la prime à l'autoconsommation, il s'agit d'une prime d'investissement pour les particuliers qui choisissent d'autoconsommer tout ou une partie de l'électricité produite par leur installation. Elle permet de recevoir, sur les 5 premières années de fonctionnement de l'installation, un montant qui dépend de la puissance installée [83]. (Tableau 44)

<b>Puissance de l'installation</b>	<b>≤ 3kWc</b>	<b>Entre 3 et 9 kWc</b>	<b>Entre 9 et 36 kWc</b>	<b>Entre 36 et 100 kWc</b>
<b>Montant de la prime en centimes d'€ par Wc installé</b>	43	32	18	9

*Tableau 44 : Montant de la prime à l'autoconsommation*

Enfin, nous pouvons aussi mentionner que même des dispositifs ne reposant pas sur une source renouvelable d'énergie mais qui sont particulièrement performants, donnent accès à des aides financières ; c'est notamment le cas de la majorité des pompes à chaleur.

En conclusion, les dispositifs d'aide financière encouragent surtout les travaux de rénovation et les investissements d'efficacité énergétique qui concernent la production de chaleur et d'eau

chaude sanitaire. Ce sont des travaux et des investissements coûteux et qui visent une rentabilité à long-terme, le soutien de l'État est donc indispensable. Il joue un rôle d'incitateur et de facilitateur qui doit permettre de baisser de manière significative l'impact environnemental du logement au sens large. Nous insistons une dernière fois sur l'importance d'avoir recours à un accompagnement avant de se lancer dans ces démarches : un conseil permettra de cibler les travaux ou les investissements les plus pertinents mais aussi de profiter au mieux des aides disponibles.

# Conclusion

L'association Forum Saint-Aunès attend de ce rapport qu'il soit un outil permettant aux habitants d'appréhender au mieux, la question des énergies renouvelables. En ce sens, nous avons d'abord traité les différentes sources qui permettent de produire une énergie d'origine renouvelable. Nous avons abordé les aspects techniques, les coûts et mis en avant les avantages et inconvénients de chaque source d'énergie renouvelable afin que les lecteurs puissent commencer à se forger une opinion. De plus, nous avons apporté des éléments de réponse quant à la faisabilité de chacune sur la commune en fonction des gisements disponibles mais également des contraintes administratives. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable que nous avons présentées, voici celles qui apparaissent comme exploitables sur la commune : le solaire, l'éolien, la géothermie, la filière bois énergie et la méthanisation. Nous remarquons que ce sont les technologies dont la maturité est déjà atteinte. Les autres usages de la biomasse sont néanmoins à surveiller car ils sont voués à se développer dans les années à venir. Enfin, l'énergie hydraulique est inexploitable pour Saint-Aunès, à la fois à cause de l'absence de cours d'eau dont le débit est suffisant pour justifier l'installation d'une centrale au fil de l'eau. Et à cause du manque de relief, qui rend impossible l'exploitation de l'énergie potentielle de l'eau pour faire du stockage.

Le stockage est d'ailleurs l'objet de la seconde partie de ce rapport puisque sa problématique est intimement liée à l'utilisation de sources renouvelables d'énergie. Nous avons détaillé les différentes voies envisageables afin de les classer. Certaines ont été écartées, d'autres sont à surveiller en vue d'une éventuelle utilisation future et d'autres sont déjà suffisamment matures pour que ceux qui le souhaitent y aient recours. Ces technologies sont :

- La batterie, pour le stockage de la production d'électricité. Elle est utilisable à l'échelle collective même si elle est plus pertinente à l'échelle individuelle ;
- Le stockage de chaleur sensible, pour stocker de l'énergie thermique. Cette énergie pourra ensuite être couplée à un réseau de chaleur dans le cas d'une installation collective de grande envergure voire être valorisée sous forme d'électricité. Pour ce qui est de l'échelle individuelle, cette méthode permettrait de profiter des apports solaires de la journée pour produire une partie de son eau chaude sanitaire ou de ses besoins en chauffage.

Ensuite, des études de cas basées sur les besoins énergétiques moyens des Français ont été réalisées afin de donner des repères sur des grandeurs physiques importantes (puissance, énergie, coût, surface, temps de retour sur investissement) aux lecteurs du rapport. Ces études sont focalisées sur des configurations réellement envisageables. Elles ont été entreprises à l'échelle individuelle mais aussi collective. Il en ressort que le potentiel des énergies renouvelables se rentabilise dans un temps plus court à l'échelle individuelle, notamment pour la production d'électricité. Quant à la production de chaleur, elle apparaît comme contraignante à l'échelle collective. En effet, l'absence de réseau de chaleur sur la commune ainsi que les coûts d'investissement importants engendrés par les technologies ne permettent pas d'envisager un retour sur investissement satisfaisant pour du bâti existant. Toutefois, il serait possible d'envisager la construction d'un lotissement neuf pour lequel l'apport de chaleur pourrait être issu d'une installation collective reliée à un petit réseau de chaleur. Pour ce qui est de l'échelle individuelle, il y a un réel potentiel notamment avec le recours aux pompes à chaleur. Ce sont des appareils performants et bien adaptés au climat de la région. De plus, les PAC peuvent à la fois permettre de chauffer un logement et de produire de l'eau chaude sanitaire.

Enfin, la dernière partie porte sur les dispositifs de soutien financier auxquels un particulier peut prétendre lorsqu'il envisage des travaux de rénovation ou d'amélioration énergétique. Qu'elles soient locales ou nationales, ces aides permettent aux particuliers d'avoir plus facilement accès à des travaux d'isolation, à un nouveau moyen de chauffage ou à des dispositifs valorisant des sources d'énergie renouvelable. Cette partie a pour vocation d'être un point de départ pour initier les démarches de recherches d'aides financières en vue de la réalisation de travaux de rénovation énergétique.

A travers ce projet, proposé par l'association Forum Saint-Aunès, nous avons pour objectif d'encourager la production d'énergie issue de sources renouvelables sur le territoire de la commune. Ce rapport permettra aux habitants d'être informés et guidés de manière objective dans leurs choix d'investissement. Nous espérons alors qu'il permettra aux lecteurs de se forger une opinion critique sur les énergies renouvelables, notamment sur les contraintes et les bénéfices liés à leur utilisation.

# Bibliographie

- [1] « Fonctionnement d'une éolienne - Les Énergies Renouvelables ». <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement-eolienne/> (consulté le 23 novembre 2022).
- [2] « Installation d'une éolienne domestique ou agricole ». <https://entreprendre.service-public.fr/vosdroits/F33368> (consulté le 23 novembre 2022).
- [3] « Définition panneau solaire, panneau solaire monocristallin », *EDF ENR*. <https://www.edfenr.com/lexique/panneaux-solaires/> (consulté le 23 novembre 2022).
- [4] H. Watt, « Fonctionnement d'un panneau solaire thermique », *Hello Watt*. <https://www.hellowatt.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-thermique/> (consulté le 23 novembre 2022).
- [5] « Panneau solaire thermique : Fonctionnement et types de panneaux », *Panneausolaire-info.fr*. <https://www.panneausolaire-info.fr/panneau-solaire-thermique> (consulté le 23 novembre 2022).
- [6] « Énergie solaire : production, rentabilité... | Choisir.com ». <https://www.choisir.com/energie/articles/104504/lenergie-solaire-est-elle-rentable> (consulté le 23 novembre 2022).
- [7] H. Watt, « Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque », *Hello Watt*. <https://www.hellowatt.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-photovoltaique/> (consulté le 23 novembre 2022).
- [8] « Les Panneaux Solaires en 4 Schémas ». <https://www.nouvelr-energie.com/pv/panneau-solaire-schema> (consulté le 23 novembre 2022).
- [9] « Quel type de panneau solaire choisir ? » <https://www.monkitsolaire.fr/blog/quel-type-de-panneau-solaire-choisir--n229> (consulté le 23 novembre 2022).
- [10] « Panneau solaire hybride : produire de l'électricité et du chauffage ». <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/panneaux-solaires-hybrides.html> (consulté le 23 novembre 2022).
- [11] « Panneau Solaire Hybride | Solution 2 en 1 », *Otovo*, 28 janvier 2022. <https://www.otovo.fr/blog/le-solaire-et-vous/panneau-solaire-hybride/> (consulté le 23 novembre 2022).
- [12] « Panneau solaire hybride : produire de l'électricité et du chauffage ». <http://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/panneaux-solaires-hybrides.html> (consulté le 23 novembre 2022).

23 novembre 2022).

[13] « etude-filière-v12-corrigée.pdf ». Consulté le: 23 novembre 2022. [En ligne].  
Disponible sur: <http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2022/07/etude-filie%CC%80re-v12-corrige%CC%81e.pdf>

[14] « guide-pratique-la-geothermie.pdf ». Consulté le: 23 novembre 2022. [En ligne].  
Disponible sur: <https://expertises.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-la-geothermie.pdf>

[15] « Focus produit : La PAC aérothermique ». <https://www.effy.fr/travaux-energetique/chauffage/pompe-a-chaaleur/pac-aerothermique> (consulté le 23 novembre 2022).

[16] « ETUDE\_APGF\_2020\_web.pdf ». Consulté le: 23 novembre 2022. [En ligne].  
Disponible sur: [http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2020/09/ETUDE\\_APGF\\_2020\\_web.pdf](http://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2020/09/ETUDE_APGF_2020_web.pdf)

[17] « Les géothermies | Geothermies ». <https://www.geothermies.fr/les-geothermies> (consulté le 23 novembre 2022).

[18] « >Quel est le prix des énergies pour le chauffage en 2020 ? », *IZI by EDF*.  
<https://www.izi-by-edf-renov.fr/blog/cout-des-energies-chauffage> (consulté le 23 novembre 2022).

[19] « Chaudière granulés ou pellet Comparatif chauffage biomasse ». <https://www.picbleu.fr/page/comparatif-prix-chaudieres-granules-bois-chauffage> (consulté le 23 novembre 2022).

[20] « Comparatif prix énergie écologique électricité bois gaz 2022 ». <https://www.picbleu.fr/page/prix-officiel-des-energies-electricite-bois-fioul-gaz> (consulté le 23 novembre 2022).

[21] « Connaissance des énergies : infos pétrole, énergie renouvelable, photovoltaïque ». <https://www.connaissancedesenergies.org/> (consulté le 23 novembre 2022).

[22] « Les principes de la pyrolyse et gazéification – Ademe », *Agence de la transition écologique*. <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-laction/valorisation-energetique/dossier/pyrolyse-gazeification/principes-pyrolyse-gazeification> (consulté le 23 novembre 2022).

[23] « La 1ère usine de recyclage chimique en France », *Grandpuits-Gargenville TotalEnergies*, 17 février 2021. <https://grandpuits.totalenergies.fr/le-projet/quatre-nouvelles-activites/la-1ere-usine-de-recyclage-chimique-en-france> (consulté le 23 novembre 2022).

[24] « Les chiffres clés de la méthanisation », *ADEME Infos*.

<https://infos.ademe.fr/magazine-fevrier-2022/faits-et-chiffres/les-chiffres-cles-de-la-methanisation/> (consulté le 23 novembre 2022).

[25] « Concepts et chiffres de l'énergie : La méthanisation agricole — CultureSciences-Physique - Ressources scientifiques pour l'enseignement des sciences physiques ». <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/chiffres-energie-methanisation.xml> (consulté le 23 novembre 2022).

[26] C. d'agriculture France, « La méthanisation agricole », 14 novembre 2022. <https://chambres-agriculture.fr/exploitation-agricole/developper-des-projets/economie-et-production-denergies/la-methanisation-agricole/> (consulté le 23 novembre 2022).

[27] « L'avantage environnemental de la méthanisation est prouvé | Techniques de l'Ingénieur ». <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/lavantage-environnemental-de-la-methanisation-est-prouve-107390/> (consulté le 23 novembre 2022).

[28] « Volet méthanisation : Questions & réponses », *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire*. <https://agriculture.gouv.fr/volet-methanisation-questions-reponses> (consulté le 23 novembre 2022).

[29] « Biocarburants », *Ministères Écologie Énergie Territoires*. <https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants> (consulté le 23 novembre 2022).

[30] « Biocarburants : quels impacts sur l'environnement ? » <https://www.edf.fr/entreprises/le-mag/le-mag-entreprises/conseils-energie-competitivite/biocarburants-sont-ils-toujours-dans-la-course-de-la-mobilite-propre> (consulté le 23 novembre 2022).

[31] CEA, « Le stockage stationnaire de l'énergie », *CEA/Découvrir & Comprendre*, 17 juillet 2020. <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-stockage-stationnaire-energie.aspx> (consulté le 23 janvier 2023).

[32] « Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) : rôle et chiffres clés », 2 janvier 2013. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-denergie-par-pompage-step> (consulté le 23 janvier 2023).

[33] C. Deluzarche, « Définition | STEP - station de transfert d'énergie par pompage - stockage hydroélectrique par pompage | Futura Planète », *Futura*. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-step-7829/> (consulté le 23 janvier 2023).

[34] R. G. Lavillat Théo, « Les STEP, stockage d'énergie par pompage turbinage », *Ecosources*. <https://www.ecosources.org/step-station-transfert-energie-pompage-turbinage>

(consulté le 23 janvier 2023).

[35] « CAES : définition du stockage d'énergie par air comprimé », 1 décembre 2013.

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/caes-stockage-par-air-comprime> (consulté le 23 janvier 2023).

[36] « Le stockage d'énergie par volant d'inertie », *Planète Énergies*. <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/le-stockage-d-energie-par-volant-d-inertie> (consulté le 23 janvier 2023).

[37] « Volant d'inertie : système de stockage d'énergie, explications », 25 mars 2015. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/volant-dinertie> (consulté le 23 janvier 2023).

[38] « Stockage thermochimique ». <http://www.recuperation-chaaleur.fr/stockage-thermochimique> (consulté le 23 janvier 2023).

[39] « WHO-FWC-PHE-EPE-17.02-fre (3).pdf ».

[40] « Batterie de stockage solaire : fonctionnement, prix et capacité | Choisir.com ». <https://www.choisir.com/energie/articles/173815/comment-choisir-une-batterie-pour-stocker-lenergie-solaire> (consulté le 23 janvier 2023).

[41] « Quelles batteries choisir ? », *MyShop Solaire*. [https://www.myshop-solaire.com/quelles-batteries-solaires-choisir--\\_r\\_80\\_a\\_238.html](https://www.myshop-solaire.com/quelles-batteries-solaires-choisir--_r_80_a_238.html) (consulté le 23 janvier 2023).

[42] « Stockage par chaleur sensible ». <http://www.recuperation-chaaleur.fr/stockage-chaaleur-sensible> (consulté le 24 janvier 2023).

[43] H. Watt, « Consommation électrique moyenne d'un foyer : kwh et prix », *Hello Watt*. <https://www.hellowatt.fr/suivi-consommation-energie/consommation-electrique/moyenne> (consulté le 23 novembre 2022).

[44] H. Watt, « [Guide] Prix panneaux solaires 2023 », *Hello Watt*. <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaiques/prix-panneaux-solaires> (consulté le 16 janvier 2023).

[45] « Prix installation panneau solaire sur une maison en 2023 », *Terre Solaire*, 7 janvier 2023. <https://terresolaire.com/Blog/rentabilite-photovoltaique/prix-installation-panneau-solaire/> (consulté le 23 janvier 2023).

[46] H. Watt, « Abonnement électricité : que choisir ? | Comparatif de prix 2023 », *Hello Watt*. <https://www.hellowatt.fr/contrat-electricite/abonnement-electricite> (consulté le 16 janvier 2023).

- [47] H. Watt, « Les aides pour l'installation de panneaux solaires en 2023 », *Hello Watt*. <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaiques/aide-installation-panneaux-solaires> (consulté le 16 janvier 2023).
- [48] « Prix installation panneau solaire sur une maison en 2022 », *Terre Solaire*, 20 mars 2022. <https://terresolaire.com/Blog/rentabilite-photovoltaique/prix-installation-panneau-solaire/> (consulté le 16 janvier 2023).
- [49] « Retrouvez toutes nos batteries solaires GEL - APB Energy », *APB-ENERGY*. <https://www.apb-energy.fr/49-batterie-gel> (consulté le 17 janvier 2023).
- [50] « A combien s'élève le tarif de rachat de l'électricité produite ? » <https://www.quelleenergie.fr/questions/eolienne-tarif-rachat-electricite> (consulté le 17 janvier 2023).
- [51] « L'éolien domestique, faut-il investir? - Conseils Thermiques ». [https://conseils-thermiques.org/contenu/eolienne\\_domestique.php](https://conseils-thermiques.org/contenu/eolienne_domestique.php) (consulté le 16 janvier 2023).
- [52] « Consommation par habitant et par ville d'électricité en France - data.gouv.fr ». <https://www.data.gouv.fr/fr/reuses/consommation-par-habitant-et-par-ville-deelectricite-en-france/> (consulté le 23 novembre 2022).
- [53] H. Watt, « [Guide 2023] Combien coûte une installation photovoltaïque ? », *Hello Watt*. <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaiques/combien-coute-installation-photovoltaique> (consulté le 23 janvier 2023).
- [54] L. MARIE, « Synthèse des aides financières 2022 et des critères d'éligibilité », *ALEC Montpellier Métropole*, 5 janvier 2022. <https://www.alec-montpellier.org/aides-financieres/synthese-et-criteres-deligibilite-des-aides-financieres/> (consulté le 12 janvier 2023).
- [55] H. Watt, « La consommation électrique d'un chauffage de 1000 W en 2023 », *Hello Watt*. <https://www.hellowatt.fr/suivi-consommation-energie/consommation-electrique/chauffage-1000w-consommation-electrique> (consulté le 12 janvier 2023).
- [56] « >Chaudière Gaz murale Naema 2 Duo 25/35 Atlantic », *IZI by EDF Renov*. <https://www.izi-by-edf-renov.fr/produit/chaudiere-gaz-condensation-naema-duo-35-atlantic> (consulté le 14 janvier 2023).
- [57] H. Watt, « Prix d'une chaudière à condensation : installation & entretien », *Hello Watt*. <https://www.hellowatt.fr/chaudiere/condensation/prix> (consulté le 14 janvier 2023).
- [58] « ETUDE\_APGF\_2020\_web.pdf ». Consulté le: 14 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.afpg.asso.fr/wp->

content/uploads/2020/09/ETUDE\_APFG\_2020\_web.pdf

[59] « Combien coûte une chaudière gaz à condensation murale ? »

<https://www.quelleenergie.fr/prix-travaux/chaudiere/chaudiere-gaz-condensation-murale>  
(consulté le 14 janvier 2023).

[60] « >Chaudière Prestige Condensation Visio Upec 120l Frisquet », *IZI by EDF Renov.*

<https://www.izi-by-edf-renov.fr/produit/chaudieres-prestige-condensation-visio-upec-120l-frisquet> (consulté le 14 janvier 2023).

[61] H. Watt, « Quel est le prix d'une chaudière au fioul ? Achat & Installation », *Hello Watt.*

<https://www.hellowatt.fr/chaudiere/fioul/prix> (consulté le 14 janvier 2023).

[62] « Radiateur électrique fixe 2000W à inertie céramique horizontal blanc - Système anti-salissures - Détecteur de fenêtre ouverte | Leroy Merlin », *Leroy Merlin - Bricolage, déco, maison, jardin.*

<https://www.leroymerlin.fr/produits/chauffage-et-ventilation/chauffage-appoint/radiateur-soufflant/radiateur-electrique-fixe-2000w-a-inertie-ceramique-horizontal-blanc-systeme-anti-salissures-detecteur-de-fenetre-ouverte-85102813.html> (consulté le 14 janvier 2023).

[63] « Combien Coûte l'Installation d'un Radiateur Electrique? Prix, Coût, Devis », *Conseils travaux.* <https://www.quotatis.fr/conseils-travaux/faq/chauffage/combien-coute-linstallation-dun-radiateur-electrique/> (consulté le 14 janvier 2023).

[64] « Poêle à granulés PALAZZETTI Ecofire Martina Idro New 21kW hydro », *Chemineo.*

<https://chemineo.fr/poele-a-granules/poele-a-granules-palazzetti-ecofire-martina-idro-new-21kw-hydro> (consulté le 14 janvier 2023).

[65] T. Chaleur, « Quel coût d'installation pour mon poêle à granulés ? », *Top Chaleur*, 22

octobre 2020. <https://www.topchaleur.com/conseils/quel-est-le-cout-d-installation-d-un-poele-a-granules/> (consulté le 14 janvier 2023).

[66] H. Watt, « PAC Bosch Compress 7000 AW Duo - Chauffage et ECS », *Hello Watt.*

<https://www.hellowatt.fr/catalogue-pompe-a-chaleur-air-eau/bosch/compress-7000-aw-duo>  
(consulté le 14 janvier 2023).

[67] « Prix d'une pompe à chaleur : à quoi s'attendre en 2023 ? »

<https://www.laprimeenergie.fr/les-travaux/la-pompe-a-chaleur-air-eau/prix> (consulté le 14 janvier 2023).

[68] « Prix d'une Pompe à Chaleur Air Air en %annee% | Tarif & Conseil », *Prix Pose.*

<https://www.prix-pose.com/pompe-a-chaleur-air-air/> (consulté le 14 janvier 2023).

[69] « Prix d'une pompe à chaleur air/air : tarifs 2023 PAC ». <https://www.m->

habitat.fr/pac/prix-pompe-a-chaleur/prix-d-une-pompe-a-chaleur-air-air-tarifs-annee-4780\_A (consulté le 14 janvier 2023).

[70] « Quel est le prix d'un entretien de chauffe-eau ? »

<https://www.ootravaux.fr/installation-entretien/plomberie/prix-entretien-chauffe-eau.html> (consulté le 14 janvier 2023).

[71] « Fournisseur d'énergie : découvrez nos offres d'énergie verte | ENGIE ».

<https://particuliers.engie.fr/fournisseur-energie.html> (consulté le 14 janvier 2023).

[72] « Prix d'un Chauffe Eau Thermodynamique en %annee% », *Prix Pose*.

<https://www.prix-pose.com/chauffe-eau-thermodynamique/> (consulté le 14 janvier 2023).

[73] « BOFiP BOI-TVA-LIQ-30-20-95 - 25/02/2014 ».

<https://bofip.impots.gouv.fr/bofip/9417-PGP.html/identifiant=BOI-TVA-LIQ-30-20-95-20140225> (consulté le 23 janvier 2023).

[74] « BOFiP BOI-TVA-LIQ-30-20-90-20 - 23/12/2020 ».

<https://bofip.impots.gouv.fr/bofip/1666-PGP.html/identifiant=BOI-TVA-LIQ-30-20-90-20-20201223> (consulté le 23 janvier 2023).

[75] « Aides et prêts pour l'amélioration et la rénovation énergétique de l'habitat ».

<https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/N321> (consulté le 24 janvier 2023).

[76] « Financer son projet », *ALEC Montpellier Métropole*. [https://www.alec-](https://www.alec-montpellier.org/rubrique/particuliers/financer-son-projet/)

[montpellier.org/rubrique/particuliers/financer-son-projet/](https://www.alec-montpellier.org/rubrique/particuliers/financer-son-projet/) (consulté le 24 janvier 2023).

[77] « Rénov'Occitanie, le Service public régional de la rénovation énergétique | AREC

Occitanie - Agence régionale Énergie Climat ». <https://www.arec-occitanie.fr/renovoccitanie-le-service-public-regional-de-la-renovation-energetique.html> (consulté le 24 janvier 2023).

[78] R. O. / Pyrénées-Méditerranée, « Les aides financières pour un logement individuel – Rénov'Occitanie », *Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée*, 13 avril 2022.

<https://renovoccitanie.laregion.fr/Les-aides-financieres-pour-les-logements-individuels> (consulté le 24 janvier 2023).

[79] « MaPrimeRénov' et les autres aides financières | France Rénov' ». <https://france-renov.gouv.fr/aides> (consulté le 24 janvier 2023).

[80] « Recherche | Entreprises | Agir pour la transition écologique | ADEME ».

[https://agirpouurlatransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/recherche?keyword=&sort\\_by=changed&sort\\_order=DESC](https://agirpouurlatransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/recherche?keyword=&sort_by=changed&sort_order=DESC) (consulté le 24 janvier 2023).

[81] « Intégrer des énergies renouvelables - ALEC Montpellier Métropole ».

<https://www.alec-montpellier.org/rubrique/particuliers/energies-renouvelables/> (consulté le 24 janvier 2023).

[82] « Photovoltaïque.info - Arrêté tarifaire en vigueur ».

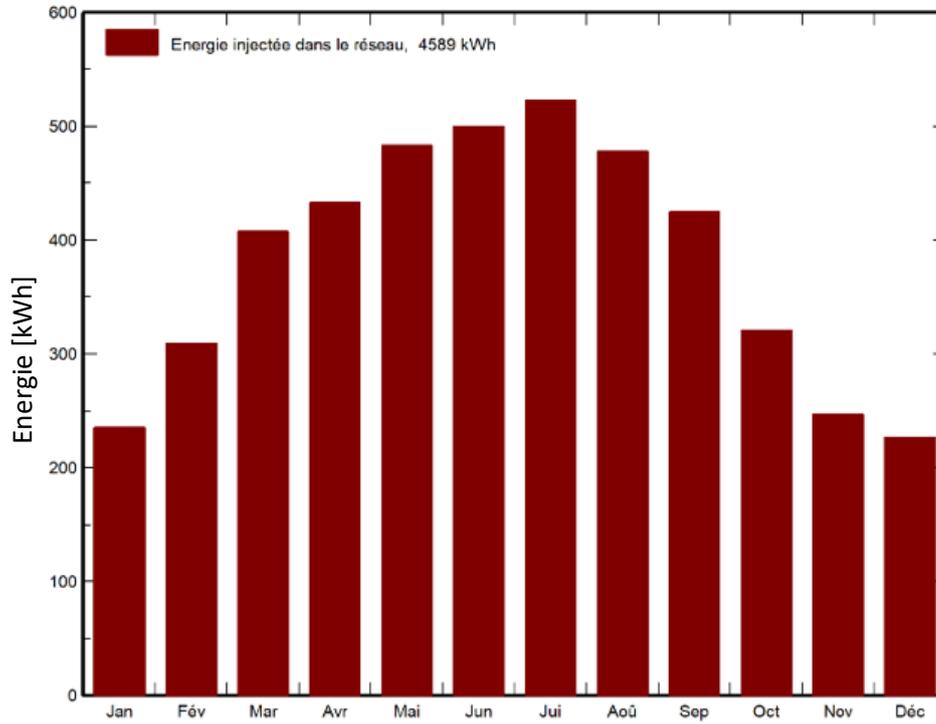
<https://www.photovoltaïque.info/fr/tarifs-dachat-et-autoconsommation/tarifs-dachat/arrete-tarifaire-en-vigueur/#tab-content> (consulté le 24 janvier 2023).

[83] « Aide panneau solaire : les 8 subventions à découvrir en 2022 ».

<http://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/aide-panneau-solaire.html> (consulté le 24 janvier 2023).

# Annexe 1 : Production photovoltaïque

Production annuelle d'électricité photovoltaïque pour une puissance de **3 kWc**.



Production annuelle d'électricité photovoltaïque pour une puissance de **6 kWc**.

