



ÉCOLE  
**CENTRALE**LYON

## ÉCOLE CENTRALE LYON

OPTION ÉNERGIE  
PROJET D'OPTION  
RAPPORT

# Identification des ZAEnR à Rignieux-le-Franc

*Élèves :*

Paul BERTHAUD  
Tristan CHEVREAU  
Jules MANSION  
Clémence MARTIN

*Enseignant :*

Éric VAGNON

*Commanditaire :*

Pierre BOILEAU

## Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>1 Méthode globale utilisée [T]</b>	<b>6</b>
1.1 Problématique . . . . .	6
1.2 Méthode : divergence-convergence . . . . .	6
1.3 Organisation générale . . . . .	7
<b>2 Contexte de la zone d'étude</b>	<b>7</b>
2.1 Étude des besoins et de la consommation [C] . . . . .	7
2.1.1 Habitants . . . . .	7
2.1.2 Bâtiments communaux . . . . .	7
2.2 Organisation spatiale et parcelles [P] . . . . .	7
<b>3 Contraintes</b>	<b>8</b>
3.1 Législatives [C] . . . . .	8
3.1.1 Éolien . . . . .	8
3.1.2 Hydraulique . . . . .	9
3.1.3 Méthanisation . . . . .	9
3.1.4 Panneaux photovoltaïques . . . . .	11
3.1.5 Panneaux photovoltaïques sur toiture . . . . .	12
3.1.6 Ombrières . . . . .	12
3.1.7 Agrivoltaïsme . . . . .	13
3.1.8 Trackers . . . . .	14
3.1.9 Géothermie . . . . .	14
3.1.10 Bois énergie . . . . .	15
3.2 Techniques [P] . . . . .	15
3.2.1 Éolien . . . . .	15
3.2.2 Hydraulique . . . . .	15
3.2.3 Méthanisation . . . . .	16
3.2.4 Panneaux photovoltaïques . . . . .	16
3.2.5 Solaire thermique . . . . .	17
3.2.6 Agrivoltaïsme . . . . .	17
3.2.7 Géothermie . . . . .	18
3.2.8 Bois énergie . . . . .	18
3.3 Acceptabilité [P] . . . . .	19
3.3.1 Éolien . . . . .	19
3.3.2 Hydraulique . . . . .	19
3.3.3 Méthanisation . . . . .	19
3.3.4 Énergie solaire . . . . .	19
<b>4 Modèle climatique</b>	<b>19</b>
4.1 Vent, Pression, Température : l'open-data de Météo-France [T] . . . . .	19
4.2 Solaire [J] . . . . .	21
<b>5 Solutions éliminées</b>	<b>22</b>
5.1 Hydraulique [T] . . . . .	22
5.2 La ferme du Giroux [P] . . . . .	23
5.3 Ombrière photovoltaïque [P] . . . . .	24

5.4 Éolien [T] . . . . .	24
<b>6 Solutions retenues et prévisions</b>	<b>28</b>
6.1 Cartographie globale des solutions étudiées (échelle de la commune) [P] . . . . .	28
6.2 Solution par solution (technique, finance, énergétique) . . . . .	29
6.2.1 Agrivoltaïsme [P] . . . . .	29
6.2.2 Photo-voltaïque sur toitures individuelles [J] . . . . .	32
6.2.3 Le solaire thermique [P] . . . . .	35
6.2.4 Méthanisation [P] . . . . .	35
6.2.5 Géothermie [P] . . . . .	35
<b>Conclusion</b>	<b>36</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>37</b>
<b>7 Annexes</b>	<b>41</b>
7.1 Contexte détaillé . . . . .	41
7.1.1 Bâtiments communaux[C] . . . . .	41
7.1.2 Cartographies[P] . . . . .	42
7.1.3 Point sur les zones agricoles strictes (AS) [P] . . . . .	46
7.2 Le simulateur AutoCalSol [J] . . . . .	46
7.3 Distribution de Weibull . . . . .	47
7.4 Contraintes détaillées . . . . .	47
7.4.1 Méthanisation [C] . . . . .	47
7.4.2 Agrivoltaïsme [P] . . . . .	48
7.4.3 Solaire thermique [P] . . . . .	52
7.4.4 Géothermie [P] . . . . .	52
7.5 La maintenance des solutions retenues [P] . . . . .	53
7.5.1 Maintenance des panneaux photo-voltaïques . . . . .	53
7.5.2 Maintenance d'un système solaire thermique . . . . .	53
7.5.3 Maintenance de la station de méthanisation . . . . .	53
7.6 Point sur la modélisation financière [T] . . . . .	53
7.7 Gestion de projet [P] . . . . .	54

## Table des figures

1	Représentation schématique du déroulement du projet . . . . .	6
2	Quelques contraintes auxquelles la commune fait face . . . . .	8
3	L'agrivoltaïsme avec l'élevage de mouton . . . . .	18
4	Température et Vitesse du vent à Ambérieu-en-Bugey . . . . .	20
5	Mesure faussée de la visibilité à Ambérieu . . . . .	21
6	Ensoleillement mensuel sur un an à Rignieux-le-Franc d'après PVGIS 5.1 . . . . .	22
7	Débit du Toison sur la commune de Rignieux-le-Franc . . . . .	23
8	Évolution de la VAN pour l'installation de la ferme du Giroux . . . . .	24
9	Densité de l'air au moyeu de l'éolienne . . . . .	25
10	Vitesse du vent au moyeu de l'éolienne . . . . .	26
11	Puissance générée par l'éolienne à Ambérieu . . . . .	26
12	Puissance générée par l'éolienne à la pointe de la Hague . . . . .	27
13	Valeurs actualisées nettes des deux éoliennes . . . . .	28
14	Implantations des différentes solutions retenues . . . . .	28
15	Évolution de la VAN pour l'installation PV bovine . . . . .	31
16	Zones restreintes pour l'implantation d'éoliennes . . . . .	42
17	Réseau électrique sur la commune de Rignieux-le-Franc . . . . .	42
18	Différents élevages sur la commune de Rignieux-le-Franc . . . . .	43
19	Parcelles retenues pour l'étude d'agrivoltaïsme . . . . .	43
20	Parcelles retenues pour l'agrivoltaïsme en culture . . . . .	44
21	Parcours du Toison (d'après la carte interactive du bassin de l'Ain) . . . . .	45
22	Localisation du parking communal . . . . .	45
23	Photo satellite de Rignieux-le-Franc (source : Google Maps) . . . . .	46
24	Potentiel géothermique en circuit fermé de la commune de Rignieux-le-Franc, Source : <a href="http://www.geothermies.fr">www.geothermies.fr</a> . . . . .	46
25	Potentiel géothermique en circuit ouvert de la commune de Rignieux-le-Franc, Source : <a href="http://www.geothermies.fr">www.geothermies.fr</a> . . . . .	46
26	Écran d'accueil du site AutoCalSol . . . . .	47
27	Profils d'une distribution de Weibull (d'après <i>Wikipédia</i> ) . . . . .	47
28	L'agrivoltaïsme et l'utilisation de la technologie d'abris climatiques . . . . .	49
29	Technologie de tracker solaire . . . . .	50
30	Schéma de la technologie proposée par OKWind . . . . .	50
31	L'agrivoltaïsme avec l'élevage de mouton . . . . .	51
32	Planification du projet . . . . .	54
33	Diagramme en flux des tâches du projet . . . . .	55

## Liste des tableaux

1	Prix moyens par étapes de désamiantage . . . . .	23
2	Énergie générée par l'éolienne par an en moyenne sur 10 ans . . . . .	27
3	Récapitulatif des puissances installées et des coûts d'installation pour l'agrivoltaïsme sur les parcelles d'élevages . . . . .	30
4	Paramètres constants pour toutes les simulations . . . . .	33
5	Table des variables d'entrée du simulateur . . . . .	34
6	Table des sorties du simulateur. (TRA : Temps de retour actualisé, identique au temps de retour sur investissement) . . . . .	34
7	Recommandations pour les élevages . . . . .	51
8	Tableau récapitulatif des temps passés sur le projet par membre du groupe . . . . .	55

## Introduction [T]

La loi 2023-175 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables (Loi ZAEnR pour Zone d'Accélération des Énergies Renouvelables) demande aux municipalités d'identifier, sur leur territoire communal, les zones potentiellement aptes à accueillir des énergies renouvelables, que ce soit en éolien, en photovoltaïque ou autre.

Dans ce contexte, ce rapport se veut répondre aux demandes de cette loi pour la commune de Rignieux-le-Franc. Néanmoins, identifier ne veut pas dire imposer, et il n'y a d'ailleurs aucune obligation pour les municipalités à proposer des zones d'accélération des EnR.

L'objectif de ce projet est donc de fournir un ensemble de recommandations de ZAEnR spécifiques à la commune, en étant le plus exhaustif possible.

*La loi ZAEnR prévoit cependant quelques restrictions et obligations. On peut citer :*

- *l'interdiction – sous conditions – des éoliennes en zone Natura 2000,*
- *l'obligation d'implanter des EnR sur 30% (au 01/07/2023) à 50% (au 01/07/2027) des toitures de bâtiments ayant plus de 500m<sup>2</sup> d'emprise au sol,*
- *l'obligation d'implanter des ombrières sur 50% de la surface des parkings de plus de 1500m<sup>2</sup>*
- *La loi prévoit aussi que l'identification de ces zones fasse l'objet d'une concertation avec la population [1].*

## Abstract

Solution	Avantages	Inconvénients	Avis
Éolien	- Faible emprise au sol	- Implantation difficile (peu d'espaces disponibles) - Gisement insuffisant - Constructions de plus de 20 mètres interdites à Rignieux	NON
Hydraulique	- Présence d'une ressource (Le Toison) - Acceptabilité bonne	- Gisement insuffisant - Impacts environnementaux	NON
Méthanisation	- Un des seuls moyens de produire du gaz - Assez des déchets disponibles pour valorisation - Habitants déjà familiarisés à la technologie	- Acceptabilité d'une deuxième centrale	OUI
Panneaux photovoltaïques au sol	- Maintenance facile - CAPEX plus faibles qu'autres PV	- Acceptabilité - Rend les terrains inutilisables - Interdits à Rignieux	NON
Panneaux photovoltaïques en toiture	- Adaptée aux particuliers - Valorisation d'une surface artificielle existante	- Éventuelles modifications结构nelles nécessaires - CAPEX élevé pour des particuliers - Existence de zones protégées	OUI (Particuliers) / NON (Giroux)
Ombrières photovoltaïques	- Parking existant - Valorisation d'une surface artificielle existante	- Trop peu de superficie disponible - Zone très enclavée - CAPEX élevé	NON
Agrivoltaïsme	- Plusieurs parcelles valorisables - Acceptabilité	- Quelques pertes de rendement sur la culture du blé et du maïs - Gestion des interfaces entre les animaux et les structures - CAPEX élevé	OUI
Trackers	- Faible emprise au sol - Productible élevé	- CAPEX élevé - Moins fiable que PV fixe	OUI
Solaire thermique	- Adapté aux particuliers	- Existence de zones protégées (bâtiments historiques par exemple)	OUI
Géothermie	- Ressource suffisante sur toute la commune (pour les boucles fermées)	- Estimation difficile de la ressource disponible - CAPEX élevé pour des particuliers	À AP-PRO-FONDIR
Bois énergie	- Valorisation des déchets de haies	- Estimation difficile de la ressource disponible	À AP-PRO-FONDIR

## 1 Méthode globale utilisée [T]

### 1.1 Problématique

Nous avons traité ce sujet en répondant à la question : "Parmi les énergies renouvelables disponibles à Rignieux-le-Franc, quelles sont celles ayant un potentiel intéressant ?"

À partir de cette question, on obtient directement qu'il faut vérifier, pour chaque énergie renouvelable, deux éléments :

1. **Sa disponibilité**, c'est-à-dire si son implantation à Rignieux-le-Franc est possible. Il faudra donc étudier un certain nombre de contraintes, telles que les contraintes législatives qui peuvent être importantes, en particulier pour les communes.
2. **Son potentiel**, c'est-à-dire, si en plus de pouvoir être implantée, l'installation produira assez d'énergie pour être utile.

### 1.2 Méthode : divergence-convergence

Nous avons donc essayé de produire une liste exhaustive des énergies renouvelables (EnR) disponibles, pour ensuite passer cette liste au travers de différents filtres (d'abord très globaux, tels que la législation, et finalement très locaux, tels que l'insolation et l'accessibilité d'une parcelle), afin qu'il ne reste plus que les énergies "intéressantes".

Notre méthode se résume donc en deux phases : une phase d'exploration des possibilités, c'est-à-dire de forte divergence, puis d'éliminations de plus en plus ciblées pour converger vers un ensemble de solutions a priori viables. La viabilité des projets a été envisagée selon le prisme financier.

Nous avons porté une attention particulière à la justification des éliminations. En effet, les technologies éliminées font aussi partie de notre réponse à la problématique.

Cette méthode est représentée schématiquement figure 1.

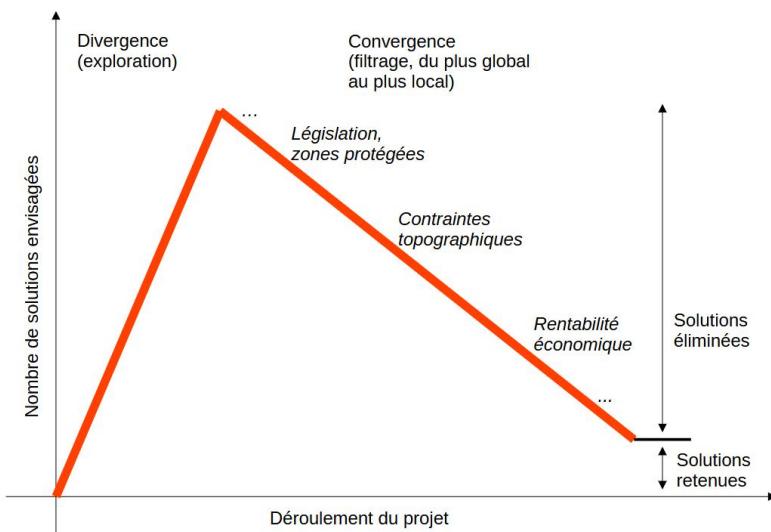


FIGURE 1 – Représentation schématique du déroulement du projet

### 1.3 Organisation générale

Nous avons divisé le sujet en groupes de tâches, puis en tâches que nous nous sommes réparties selon les compétences de chacun. Toutes les deux semaines environ, nous faisions un point avec notre commanditaire afin de vérifier que nous répondions au sujet selon le point de vue souhaité. Cet aspect du projet est décrit dans les annexes.

Nous nous sommes aussi déplacés à Rignieux-le-Franc afin de pouvoir confronter notre vision et nos solutions à la réalité.

## 2 Contexte de la zone d'étude

### 2.1 Étude des besoins et de la consommation [C]

#### 2.1.1 Habitants

D'après Enedis, la consommation annuelle moyenne d'électricité par foyer à Rignieux-le-Franc est de  $7,9MWh$  [2]. Cette information sera réutilisée plus tard dans l'étude.

#### 2.1.2 Bâtiments communaux

Il y a quatre bâtiments communaux : il s'agit de la mairie, la salle des fêtes, la bibliothèque et l'école. Ces bâtiments sont chauffés par une chaufferie bois qui les alimente par un circuit d'eau.

Ces bâtiments sont alimentés par une chaufferie par bois déchiqueté. En 2023, 65 tonnes de bois déchiquetés ont été utilisés. La conversion étant de 1 kg pour  $2.20kWh$  à  $2.80kWh$  PCI [3]. La consommation totale est donc entre  $143MWh$  et  $182MWh$  pour un an.

### 2.2 Organisation spatiale et parcelles [P]

Nous nous sommes attelés à étudier l'organisation en parcelles ainsi que les contraintes géographiques et topographiques auxquelles la commune fait face. Pour cela, nous nous sommes basés sur les informations contenues dans le plan local d'urbanisme de la commune, sur le portail cartographique des énergies renouvelables de l'état (voir le site [4], qui détaille les potentiels de chaque énergie ainsi que les implantations et les réseaux existants), ainsi que sur les informations transmises par le commanditaire au besoin. Les cartographies réalisées pour l'étude ont été éditées sur le logiciel QGis.

Tout d'abord, la commune possède un centre urbanisé et des zones en urbanisation ou à urbaniser. Ces zones ne pourront donc pas accueillir tous les moyens de production d'énergie (nous pensons à l'agrivoltaïsme par exemple). En parallèle, Rignieux-le-Franc étant une commune agricole, elle possède des zones agricoles strictes, incompatibles avec l'implantation de moyens de production d'énergie (plus de détails sur ces zones sont donnés en annexe). Ces zones sont représentées sur le plan 2 ci-dessous.

En bordure du plateau dombiste et de la plaine bressane, la commune accueille de nombreuses zones naturelles, et notamment des zones classées Natura 2000. Ces zones naturelles (représentées sur le plan 2) sont donc incompatibles et seront écartées de l'étude.

En plus de ces contraintes réglementées, la commune accueille une zone pouvant être inondée située le long de son seul cours d'eau : la Toison. Plusieurs parcelles sont aussi impactées par des glissements de terrains. Ces éléments sont aussi représentés sur le plan 2 ci-dessous.

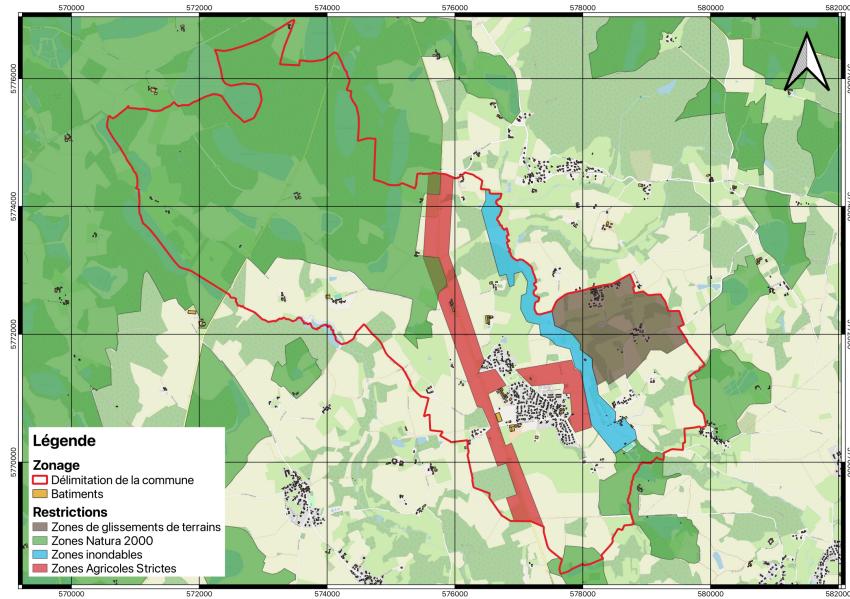


FIGURE 2 – Quelques contraintes auxquelles la commune fait face

La plupart des technologies étudiées étant des moyens de production d'énergie électrique, nous avons étudié le réseau électrique aérien et souterrain installé sur toute la commune. Garder en tête le développement de ce réseau (détaillé sur la carte 17) nous permettra d'optimiser l'étude de l'implantation de différents moyens de production afin de minimiser les coûts ainsi que les travaux d'installation.

Enfin, la commune étant fortement agricole, l'agrivoltaïsme apparaît comme une solution à étudier en profondeur. Une des premières étapes de l'étude a donc été de repérer les principales exploitations agricoles de notre zone d'étude et de détailler sous quelle forme l'exploitation a lieu. La carte 18 détaille les différents élevages présents sur Rignieux-le-Franc. Pour ce qui est des parcelles dédiées à la culture, elles sont nombreuses à ne pas être localisées sur des zones restreintes, nous les étudierons donc au cas par cas.

### 3 Contraintes

#### 3.1 Législatives [C]

##### 3.1.1 Éolien

Il faut savoir que Rignieux-le-Franc possède très peu de parcelles où l'on peut placer des éoliennes. De plus, les constructions de plus de 20 mètres de hauteur sont interdites. Les démarches dépendent de la nature du projet éolien et sont détaillées ci-après.

**Parc éolien** Les différentes autorisations sont toutes regroupées dans une procédure dite "d'autorisation unique" dépendant de l'autorisation du préfet. Cette autorisation prévoit une étude d'impacts et de dangers du projet sur l'environnement avec de nombreux critères tels que l'impact paysager, la biodiversité, le bruit et les risques pour les riverains. Elle prévoit également une enquête publique avec affichage dans un rayon de 6km autour du lieu envisagé pour l'implantation des éoliennes. Le préfet examine cette instance puis prend sa décision via arrêté préfectoral. Cet arrêt peut fixer des prescriptions complémentaires et compensatoires qui viennent s'ajouter aux prescriptions réglementaires nationales en fonction des résultats des consultations

et de l'enquête publique. [5]

**Éoliennes domestiques** Si la hauteur de l'éolienne (mât plus nacelle) est inférieure à 12 mètres, alors l'implantation est possible sans autorisation préalable, ni permis de construire, sauf dans certains sites classés ou en instance de classement, comme des sites patrimoniaux remarquables et aux abords des monuments historiques. Dans ces cas-là, il faut déposer une déclaration préalable de travaux.

Dans le cas d'une éolienne dont la hauteur est supérieure à 12 mètres, il faut un permis de construire à demander à la mairie. Le projet doit 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. De plus, l'installation de plus de 12 mètres est considérée comme une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE). La réglementation dépend de la puissance de l'éolienne : pour une puissance inférieure à 20MW, il faut une déclaration (la démarche se fait à la préfecture du département). Si la puissance est supérieure à 20MW, il faut une autorisation environnementale, toujours à la préfecture du département.

Si la puissance du site est supérieure à 50MW, la mise en service nécessite une déclaration d'exploiter une installation de production d'électricité, à envoyer au bureau des réseaux électriques et de la réglementation de l'énergie.

Les éoliennes domestiques peuvent être raccordées au réseau public de distribution d'électricité (rachat de l'énergie produite) ou bien alimenter directement le bâtiment (autoconsommation).

Enfin, si le terrain sur lequel l'éolienne va être installée avait une destination forestière, il faut obtenir une autorisation de défrichement auprès de la direction départementale des territoires (DDT). De plus, si l'installation d'une éolienne porte atteinte à des espèces protégées (faune et flore) ou à leur habitat, une dérogation espèces protégées doit être obtenue auprès de la préfecture de département. Cette dérogation peut être obtenue lorsque les trois conditions suivantes sont remplies :

- absence de solution alternative satisfaisante
- ne pas nuire au maintien, dans un état de conservation favorable, des populations des espèces concernées dans leur habitat naturel
- projet qui répond, par sa nature et compte tenu des intérêts économiques et sociaux, à une raison impérative d'intérêt public majeur [6]

### 3.1.2 Hydraulique

D'après le **Code de l'énergie**, toute installation hydraulique doit avoir l'autorisation de l'État. Les installations dont la puissance maximale est inférieure à 4.5MW nécessitent l'obtention d'une autorisation environnementale, délivrée par le préfet pour une durée limitée, et sont soumises aux lois locales de l'environnement.

Les installations dont la puissance maximale est supérieure à 4.5MW appartiennent à l'État, et sont gérés par des concessionnaires. En deçà de 100MW, la concession est délivrée par le préfet, et au-delà, elle est délivrée par le ministre chargé de l'énergie. [7]

### 3.1.3 Méthanisation

Le cadre réglementaire relatif à la méthanisation relève de 3 codes :

**Le Code de l'environnement** La législation va dépendre du type de matière méthanisée : 2781-1 pour la méthanisation de matière végétale brute, d'effluents d'élevage, de matières ster-coraires, de lactosérum et de déchets végétaux d'industries agro-alimentaires, et 2781-2 pour la méthanisation d'autres déchets non dangereux.

Elle dépend également de la quantité journalière de déchets traités (en tonnes par jours). Pour la méthanisation de matière végétale brute (2781-1) :

- si la quantité journalière de déchets traités est inférieure à 30 tonnes par jour, une simple déclaration (avec contrôles périodiques) est nécessaire
- si la quantité journalière est entre 30 (inclus) et 100 (exclus) tonnes par jour, il faut un enregistrement
- enfin, si elle est supérieure ou égale à 100 tonnes par jour, il faut une autorisation

Dans le cas de la méthanisation d'autres déchets non dangereux (2781-2), lorsque la seule activité de traitement des déchets exercée est la digestion anaérobie (dans un milieu privé d'air) :

- si la quantité journalière est inférieure à 100 tonnes par jour, il faut un enregistrement
- si elle est supérieure ou égale à 100 tonnes par jour, il faut une autorisation

Dans le cas où l'une des activités suivantes est en vigueur, le seuil est à 75 tonnes par jour au lieu de 100 par jour :

- traitement biologique
- prétraitement des déchets destinés à l'incinération ou à la co-incinération
- traitement du laitier et des cendres
- traitement en broyeur de déchets métalliques, notamment déchets d'équipements électriques et électroniques et véhicules hors d'usage ainsi que leurs composants

Les installations biogaz sont susceptibles de devoir respecter d'autres considérations du Code de l'environnement que nous détaillons dans la partie 7.4.

Les interlocuteurs privilégiés pour ces démarches peuvent être la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), la Direction Départementale des Territoires (DDT), la Direction Départementale de l'Emploi, de la Protection des Populations (DDPP) ou la Direction départementale de l'emploi, du travail, des solidarités et de la protection des populations (DDETSPP) du lieu d'implantation.

**Le Code de l'urbanisme** En fonction de sa surface, une installation biogaz peut être soumise à une déclaration préalable ou à un permis de construire. Ces règles varient d'une mairie à l'autre.

De plus, l'implantation d'une tel dispositif doit d'être compatible avec les règlements d'urbanisme en vigueur (plan d'occupation des sols, plan local d'urbanisme ou règlement national d'urbanisme). L'interlocuteur privilégié est la Direction Départementale des Territoires (DDT) du lieu d'implantation.

**Le Code de l'énergie** Les installations biogaz de puissance supérieure à 50MW sont soumises à autorisation d'exploiter. Les installations de puissance inférieure sont réputées autorisées et aucune démarche administrative n'est nécessaire. La demande est à adresser au ministère de la transition énergétique.

De plus, tout producteur de biométhane souhaitant injecter sa production dans les réseaux de transport et de distribution de gaz naturel est éligible à une obligation d'achat en guichet ouvert sous réserve de la préservation du bon fonctionnement des réseaux.

Dans ce système, le biométhane injecté est acheté par un fournisseur de gaz naturel à un

tarif d'achat fixé à l'avance et permettant de couvrir les coûts d'investissement et d'exploitation de l'installation de production de biométhane tout en assurant une rentabilité normale du projet. L'obligation d'achat est contractée pour une durée de 15 ans.

Il est important de noter que les contrats d'obligation d'achat à tarif réglementé sont réservés aux installations présentant une production annuelle prévisionnelle inférieure à  $25GWh$  PCS par an.

Un producteur de biométhane qui souhaite vendre sa production injectée dans le cadre d'un contrat d'obligation d'achat peut :

- s'adresser au fournisseur de gaz naturel de son choix,
- s'adresser à un fournisseur de gaz naturel qui a manifesté son intérêt pour l'achat de biométhane, éventuellement par zone géographique, parmi la liste des fournisseurs intéressés par l'achat de biométhane,
- et en cas de refus des fournisseurs de gaz naturel contactés, s'adresser à un des acheteurs de dernier recours de biogaz désignés en application de l'article D. 466-14 du Code de l'énergie

[8]

### 3.1.4 Panneaux photovoltaïques

Comme pour la méthanisation, le cadre législatif relève de 3 codes :

**Le Code de l'environnement** Différentes démarches sont nécessaires, selon les caractéristiques du projet.

Les installations au sol dont la puissance dépasse  $250kWc$  sont soumises à une **étude d'impact environnemental**. Pour les installations sur serres et ombrières dont la puissance dépasse  $250kWc$ , l'étude n'est pas forcément obligatoire, c'est au cas par cas.

Les installations au sol d'une puissance supérieure à  $250kWc$  sont également soumises à une **enquête publique** dans le cadre de la procédure du permis de construire.

Elles peuvent également devoir respecter d'autres considérations environnementales, comme :

- les risques d'implantation en zone inondable
- les risques incendie
- le périmètre de protection des captages publics
- la législation sur l'eau
- la loi littoral (ce qui ne concerne pas Rignieux-le-Franc)
- la loi montagne (encore une fois, cela ne concerne pas Rignieux-le-Franc)
- les zones Natura 2000 (Rignieux-le-Franc en possède, et cela est détaillé dans la partie Organisation spatiale et parcelles [P])

Pour ces démarches, l'interlocuteur à joindre est la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) du lieu d'implantation.

**Le Code de l'urbanisme** L'installation doit être soumise soit à un permis de construire, soit à une déclaration préalable, en fonction de sa puissance et de la localisation.

Si l'installation est en dehors d'un secteur protégé, alors :

- lorsque la puissance crête est inférieure à  $3kWc$ , alors soit il n'y a pas besoin de formalité lorsque la hauteur de l'installation est inférieure à  $180cm$ , soit il faut une déclaration préalable

- lorsque la puissance crête est comprise entre  $3kWc$  et  $250kWc$ , il faut une déclaration préalable
- enfin, lorsque la puissance crête est supérieure à  $250kWc$ , il faut un permis de construire

Si l'installation est dans un secteur protégé, alors :

- si la puissance crête est inférieure à  $3kWc$ , il faut une déclaration préalable
- dès que la puissance crête est supérieure à  $3kWc$ , il faut un permis de construire

Les secteurs protégés concernent

- les sites patrimoniaux remarquables
- les abords de monuments historiques (à Rignieux-le-Franc cela concerne uniquement les abords de la croix près de l'église)
- les sites classés ou en instance de classement
- les réserves naturelles
- les cœurs de parcs nationaux ou espaces ayant vocation à être classés dans le cœur d'un futur parc

Il faut également que l'installation soit compatible avec les réglementations d'urbanisme en vigueur, comme le PLU. À Rignieux-le-Franc les installations photovoltaïques au sol sont interdites.

**Le Code de l'électricité** Les installations de puissance supérieure à 50 MW sont soumises à une autorisation d'exploiter. La demande est à adresser au ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer. [9]

### 3.1.5 Panneaux photovoltaïques sur toiture

Les panneaux photovoltaïques sur toiture relèvent du **Code de l'urbanisme**. Si le bâtiment sur lequel les panneaux vont être installés est déjà construit, il suffit de faire une déclaration préalable en mairie. Cependant, si le bâtiment n'est pas encore construit, il faut rajouter l'installation de panneaux dans le permis de construire.

Pour mettre en service les panneaux dans le cas où une partie de l'électricité est vendue, il faut faire une **demande de raccordement** au gestionnaire de réseau d'électricité sur la commune (dans le cas de Rignieux-le-Franc, il s'agit d'Enedis). Lors de cette demande, il faut signer un contrat (d'une durée de 20 ans) d'obligation de vente avec le gestionnaire du réseau, qui l'oblige à acheter l'électricité. Chaque année, à la date de renouvellement du contrat, il faut adresser la facture au gestionnaire de réseau.

Si toute l'électricité est consommée, il faut signer une **convention d'autoconsommation sans injection (CACSI)**.[10]

### 3.1.6 Ombrières

L'article 40 de la loi ApER rend obligatoire l'implantation de panneaux photovoltaïques sur ombrières sur les parcs de stationnement extérieurs existants au 1er juillet 2023, de plus de  $1500m^2$ , sur au moins 50 % de la superficie des parcs [11]. Cela ne concerne pas la commune de Rignieux-le-Franc, car le parking communal fait moins de  $1000m^2$ .

Pour les autorisations, cela va dépendre de la surface d'emprise au sol.

- si cette surface est inférieure à  $5m^2$ , alors aucune démarche n'est nécessaire
- si la surface est comprise en  $5$  et  $20m^2$ , il faut une déclaration de travaux délivrée par la mairie

- enfin, si la surface est supérieure à  $20m^2$ , il faut un permis de construire et une déclaration de travaux

Il est important de noter que si l'ombrière est dans un secteur protégé (voir partie Panneaux photovoltaïques), il faut dans tous les cas un permis de construire. Il faut également l'avis des Architectes des Bâtiments de France. [12]

### 3.1.7 Agrivoltaïsme

D'après le **Code de l'énergie**, une installation agrivoltaïsme est "une installation de production d'électricité utilisant l'énergie radiative du soleil et dont les modules sont situés sur une parcelle agricole où ils contribuent durablement à l'installation, au maintien ou au développement d'une production agricole". Il faut que l'activité agricole reste l'activité principale de l'exploitation, et qu'elle soit réversible.

La loi ApER prévoit que les autorisations d'exploiter ne soient valables que pour un temps limité (sous condition de démantèlement et de réversibilité). Pour continuer le projet au-delà de ce temps (40 ans selon le projet de loi) il faut renouveler par demande d'une autorisation d'urbanisme.

Il y a plusieurs étapes pour pouvoir mener à bien un projet d'agrivoltaïsme. Tout d'abord, il faut demander **un permis de construire**. La demande se fait auprès du ou de la préfet(e), et doit comporter :

- un document relatif à la consommation d'espace naturel et forestier
- une description de la parcelle agricole
- des informations attestant que l'activité principale est agricole
- des informations assurant de la production agricole significative et assurant des revenus durables à l'exploitation
- un certificat d'agriculteur actif
- la constitution de garanties financières couvrant les opérations de démantèlement et la remise en état du site

Ensuite, le ou la préfet communique la demande de permis au ou à la maire, pour avoir une **autorisation préalable de la mairie**. Cette demande devra comporter :

- un document relatif à la consommation d'espace naturel et forestier
- des informations assurant de la production agricole significative et assurant des revenus durables à l'exploitation
- la constitution de garanties financières couvrant les opérations de démantèlement et la remise en état du site
- un état des lieux au moment de la demande, faisant état des constructions, du biotope et d'éléments paysagers

Puis, **une étude préalable agricole** va être effectuée, les projets d'installations agricoles étant soumis au régime de l'étude préalable prévue à l'article L. 112-1-3 du Code Rural et de la Pêche Maritime.

Comme précisé dans la partie Panneaux photovoltaïques, si la puissance crête est supérieure à  $250kWc$ , l'installation est soumise à une étude d'impact environnemental si les panneaux sont au sol. Dans le cas de l'agrivoltaïsme, c'est au cas par cas. [13]

Le développeur des panneaux s'occupe de toutes les démarches administratives, afin d'obtenir les autorisations nécessaires à la mise en œuvre du projet. Il s'assure de la compatibilité du

projet avec le PLU, qui classe les parcelles selon leur nature (A pour agricole, N pour naturelle, U pour urbanisée, et AU pour à urbaniser). Au besoin, il peut demander la modification de ces documents auprès des services d'urbanisme de la préfecture, avec l'aval de la commune.

Dans certains cas, il faudra attendre les résultats d'enquêtes publiques et d'études d'impact environnemental (EIE), qui peuvent être exigées par la DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement). [14]

### 3.1.8 Trackers

Les différentes démarches sont précisées dans le **Code de l'urbanisme**, dans la partie Panneaux photovoltaïques. Ainsi, si l'installation est en dehors d'un secteur protégé, alors :

- lorsque la puissance crête est inférieure à  $3kWc$ , alors soit il n'y a pas besoin de formalité lorsque la hauteur de l'installation est inférieure à  $180cm$ , soit il faut une déclaration préalable
- lorsque la puissance crête est comprise entre  $3kWc$  et  $250kWc$ , il faut une déclaration préalable
- enfin, lorsque la puissance crête est supérieure à  $250kWc$ , il faut un permis de construire

Si l'installation est dans un secteur protégé, alors :

- si la puissance crête est inférieure à  $3kWc$ , il faut une déclaration préalable
- dès que la puissance crête est supérieure à  $3kWc$ , il faut un permis de construire

Les secteurs protégés concernent :

- les sites patrimoniaux remarquables
- les abords de monuments historiques (par exemple à Rignieux-le-Franc les abords de l'église)
- les sites classés ou en instance de classement
- les réserves naturelles
- les cœurs de parcs nationaux ou espaces ayant vocation à être classés dans le cœur d'un futur parc

Enfin, comme pour la partie Panneaux photovoltaïques sur toiture, il faudra faire une demande de raccordement à Enedis, et potentiellement signer un contrat de rachat. [15]

### 3.1.9 Géothermie

Les installations géothermiques sont soumises à deux codes.

**Le Code minier** Les sites géothermiques relèvent du régime légal des mines. Le Code minier encadre ces sites en délivrant deux titres : le permis exclusif de recherche pour la phase d'exploration et la concession pour la phase d'exploitation.

Pour obtenir le permis exclusif de recherche, il faut déposer une demande de permis auprès du ministère chargé des mines. Ensuite, le dossier de demande est transmis à la préfecture concernée pour la consultation des services administratifs et de l'autorité militaire intéressés, ainsi que des maires des communes impactées. Le permis exclusif de recherches est attribué pour une durée de cinq années maximum et il peut être prolongé, à deux reprises, de cinq années maximum.

La concession est octroyée pour une période initiale de 50 années maximum et peut être renouvelée plusieurs fois pour 25 années au maximum.

**Le Code de l'énergie** Les installations de puissance supérieure à  $50MW$  sont soumises à autorisation d'exploiter. Les installations de puissance inférieure sont réputées autorisées et aucune démarche administrative n'est nécessaire. Les démarches sont à adresser au ministère de la transition écologique.[16]

### 3.1.10 Bois énergie

Comme précédemment, les installations de puissance supérieure à  $50MW$  sont soumises à autorisation d'exploiter. Celles en dessous de  $50MW$  ne nécessitent aucune démarche administrative.

Les chaufferies bois ne peuvent pas être installées en sous-sol, au rez-de-chaussée ou à un étage courant si la puissance thermique totale installée est supérieure à  $1MW$ . Elles peuvent être installées au dernier niveau non habité ou sur une terrasse si la puissance utile est inférieure à  $2MW$  OU si la puissance utile est inférieure à  $5 MW$  et si la puissance unitaire de chaque chaudière est inférieure à  $2MW$  et s'il y a des dispositions matérielles limitant la température de l'eau à  $110^{\circ}C$ . Elles peuvent être installées en extérieur avec une puissance thermique jusqu'à  $20MW$ .

## 3.2 Techniques [P]

*Dans un souci de clarté et de concision, cette section n'inclut pas l'intégralité des détails techniques et des sources pour chacun des procédés. Pour une lecture exhaustive, veuillez consulter l'annexe 7.4.*

### 3.2.1 Éolien

Afin d'étudier la rentabilité d'un projet éolien, une étude du potentiel éolien doit être réalisée en amont de la phase de construction du projet. Cette étude aura pour vocation la détermination du productible du projet, en s'appuyant sur des études in situ (en ayant choisi une station météorologique de référence cohérente), ainsi que sur des simulations numériques.

Les infrastructures des projets éoliens étant très imposantes, des fondations importantes doivent être réalisées. Il est donc nécessaire d'avoir à disposition un sol stable et permettant d'assurer la stabilité des ouvrages.

De plus, il faut s'assurer que le réseau électrique local soit suffisant pour évacuer l'énergie issue de l'installation, ou estimer les travaux nécessaires afin de rendre la zone compatible.

Enfin, une étude de la zone alentour, et notamment celle des routes et des moyens d'accès, doit être réalisée. Les projets éoliens étant constitués de pièces de très grandes tailles, les routes doivent être suffisamment larges afin de pouvoir assurer l'acheminement des pièces jusqu'au site. Dans le cas contraire, des travaux peuvent être envisagés. Dans le cas de zones agricoles, des coûts de compensation des éventuels dégâts et des pertes agricoles doivent être estimés afin de dédommager les propriétaires.

### 3.2.2 Hydraulique

Tout d'abord, le projet doit être implanté dans une zone offrant une ressource hydrologique suffisante et compatible. La ressource en eau doit être exploitable (elle ne doit pas être protégée) et doit offrir un débit d'eau permettant le fonctionnement de l'ouvrage tout au long de l'année. Il est important que l'installation soit adaptée à la ressource, en effet, un surdimensionnement ne permettrait pas la rentabilité d'un tel projet (très souvent extrêmement coûteux à l'installation).

La géologie et la topographie sont des éléments dimensionnant pour un projet hydraulique. Les sols doivent être aptes à recevoir les fondations de ces ouvrages qui imposent très souvent de fortes sollicitations. Par exemple, un sol de trop faible cohésion ou saturé en eau ne sera pas intéressant.

### 3.2.3 Méthanisation

Tout d'abord, l'approvisionnement en matière première doit être en quantité suffisante, et relativement local (afin d'éviter des émissions trop importantes en lien avec le transport notamment). Notre rencontre avec un agriculteur de Rignieux-le-Franc qui commencera l'exploitation d'une usine de méthanisation en mai 2024 nous a permis d'obtenir des informations sur les besoins et sur le productible d'une centrale. D'après lui, **500 ha de cultures intersaison** suffiraient à approvisionner une usine alimentant 12000 à 14000 personnes en gaz.

Avant d'implanter une station de méthanisation, il sera nécessaire d'étudier le réseau de gaz existant (localisation, approvisionnement existant, consommation...). De plus, ce procédé fait face à plusieurs contraintes quant à l'injection du biogaz produit sur le réseau. Premièrement, la conformité des intrants doit être assurée. Les gaz issus de méthanisation ne peuvent provenir uniquement de sources issues :

- de l'industrie agroalimentaire
- de déchets ménagers et verts
- de la restauration collective
- des activités agricoles

Aussi, des contrôles de densité, sur le pouvoir calorifique supérieur du gaz, sur ses teneurs en soufre, devront notamment être réalisées (toutes les deux minutes selon GRDF). Enfin, la quantité injectée doit être entièrement consommée sur le réseau.

### 3.2.4 Panneaux photovoltaïques

**Panneaux en toiture :** Lors d'une installation de panneaux photovoltaïque en toiture, il faut veiller à maintenir la bonne tenue structurelle de l'édifice. En tenant compte des panneaux ainsi que des éléments de supports, une surcharge moyenne de  $15\text{kg/m}^2$  est à prévoir (d'après [17]). De plus, les panneaux placés en toiture devront faire face aux intempéries. Ils devront notamment résister à la grêle et aux vents violents (de plus en plus récurrents et violents ces dernières années).

Afin de maximiser la production, et donc de rentabiliser l'installation (tant énergétiquement que financièrement), l'orientation de la toiture doit être prise en compte dans le choix du site, ainsi que dans le placement des panneaux photovoltaïques. Enfin, toujours dans l'optique de maximiser la production, l'inclinaison des panneaux devra être adaptée à la toiture retenue (une inclinaison variant entre  $30^\circ$  et  $35^\circ$  étant préconisée par [18]).

**Ombrières :** La première contrainte liée à l'installation d'ombrières sur les espaces publics (parking, toitures de centres commerciaux, infrastructures sportives...) est la continuité de l'activité ou bien de l'usage qui précédait son installation. Dans le cas d'un parking, la mise en place d'un tel dispositif ne doit pas empêcher la circulation et le stationnement des véhicules. De plus, il serait préférable d'éviter au maximum les pertes d'espaces de stationnement. Lors de la construction des ombrières, il sera peut-être nécessaire de déplacer certaines structures, comme des lampadaires, voire d'en détruire. L'infrastructure devra prévoir un moyen pour assurer la collecte et l'évacuation des eaux pluviales. Une étude des moyens existants avant l'installation de l'ouvrage pourrait être nécessaire. Enfin, il sera nécessaire d'étudier la solution de raccordement au réseau de la technologie retenue.

### 3.2.5 Solaire thermique

Selon la localisation, la superficie de panneaux à installer ne sera pas la même. D'après l'ADEME, l'Agence de la transition écologique(voir le document [19]), un chauffe-eau solaire individuel équipé de  $4m^2$  de capteurs serait nécessaire pour fournir en eau chaude une famille de 4 personnes vivant dans le nord de la France. Pour une famille de 4 personnes vivant dans le sud de la France, un chauffe-eau solaire individuel équipé de  $2m^2$  de capteurs serait suffisant.

L'orientation et l'inclinaison des capteurs récepteurs doivent être optimisée, l'ADEME préconise une inclinaison idéale de  $30^\circ$  à  $45^\circ$ , avec idéalement une orientation vers le sud (voir le document [19]).

Enfin la bonne tenue structurelle de la charpente doit être assurée. Une surcharge du même ordre de grandeur que celle apportée par les panneaux photovoltaïques peut être retenue.

### 3.2.6 Agrivoltaïsme

Rignieux-le-Franc accueillant des exploitations dédiées à la culture céréalière ainsi que des exploitations dédiées à l'élevage d'animaux, nous étudierons les contraintes techniques liées à l'agrivoltaïsme pour ces deux cas d'études précis.

**Agrivoltaïsme et culture céréalière :** Selon l'ADEME, la pertinence (ou non) d'un projet agrivoltaïque repose sur son degré d'incidence sur la production agricole ainsi que sur son impact sur les revenus de l'exploitation. Tout d'abord, pour évaluer l'incidence sur la production agricole, il est nécessaire de prendre en compte les modifications sur les rendements des cultures. En effet, la présence de panneaux solaires peut, selon la technologie utilisée :

- réduire l'ensoleillement
- augmenter l'humidité au sol
- diminuer la température au sol
- augmenter la hauteur de pousse des cultures,
- compromettre le passage des engins utilisés pour l'exploitation
- réduire l'espace utile au sol

Ces facteurs peuvent notamment avoir pour conséquence une baisse de rendement des cultures. Bien qu'aucun consensus n'existe sur une valeur précise de la perte de rendement des cultures, dans des conditions météorologiques tempérées (similaires à celles présentes dans notre zone d'étude), un ordre de grandeur de perte sur les récoltes en céréales variant **entre 5 % et 10 %** semble être retenu pour des abris climatiques fixes.

**Agrivoltaïsme et élevage :** Les contraintes liées à l'implantation d'agrivoltaïsme sur des espaces dédiés à l'élevage sont principalement de deux types :

- le bien-être animal
- la protection des infrastructures

Si la mise en place de rangs de panneaux solaires constitue un abri de chaleur pour les animaux lorsque les conditions thermiques deviennent difficiles (voir l'image 3), ils ne doivent pas être dimensionnés à la légère. Afin d'être compatibles avec l'élevage, les structures ne doivent pas occasionner de ségrégation (afin d'éviter d'isoler certains spécimens, notamment les plus jeunes). Pour cela, des hauteurs permettant le passage de tous les individus doivent être privilégiées. Ces hauteurs permettront aussi d'éviter les blessures des animaux suites à des collisions avec les modules et à des problèmes avec les câbles électriques.



FIGURE 3 – L’agrivoltaïsme avec l’élevage de mouton

Les modules devront aussi permettre le passage des engins d’entretien des parcelles et de maintenances. Pour cela, ils devront être placés suffisamment loin des clôtures et suffisamment écartés les uns des autres.

### 3.2.7 Géothermie

Tout d’abord, il est nécessaire de connaître le potentiel de la ressource, celui-ci va déterminer la viabilité ou non d’un projet de géothermie. Lors de l’étude du potentiel géothermique, on peut s’intéresser à deux types de ressources :

- la ressource géothermique de surface sur échangeur ouvert (nappe)
- la ressource géothermique de surface sur échangeur fermé (sonde)

Ces disponibilités en ressources sont détaillées sur des cartes de potentiel géothermique.

La seconde contrainte est de l’ordre spatial. En effet, les forages en nappes superficielles nécessitent une place de  $150m^2$  (voir la source [20]). De plus, des distances allant de  $100m$  à  $200m$  devront séparer les différents forages (voir le document [20]).

### 3.2.8 Bois énergie

La première contrainte à étudier est le besoin en énergie sur la zone d’étude. Une fois le besoin étudié, il est important d’étudier les moyens d’approvisionnement en combustible. Cet approvisionnement peut se faire par le domaine urbain (élagueurs et services espaces verts de villes), ou par le domaine des bois de rebut (récupérateurs de déchets et négociants en bois). Il faut donc s’assurer que ces sources d’approvisionnement seront suffisantes sur la zone et que cela n’interférera pas avec d’autres activités (nous pouvons penser à la méthanisation, qui utilisera aussi certains déchets agricoles et d’espaces verts). Dans le cas où la source d’approvisionnement n’est pas suffisante, il pourrait être envisagé de combiner le bois à d’autres combustibles (généralement fossiles, ce qui ne rentre pas dans le cadre de la loi APER, et donc dans notre projet).

Certains points à vérifier lors du choix des combustibles sont :

- la présence de moyens de livraisons adéquats avec le combustible (selon les volumes du combustible choisi et sa forme).
- la compatibilité avec les routes du mode de livraison.

Dans un second temps, une fois le combustible choisi et le moyen de livraison vérifié, il faudra choisir un type de silo d’entreposage du combustible et une zone d’entreposage. Ces infrastructures peuvent avoir une emprise au sol relativement importante selon la technologie choisie et suivant la taille de l’exploitation (l’alternative d’enfoncer les silos et de les dimensionner relativement étroit et profond permet de gagner de l’espace au sol).

L’idéal étant de rapprocher au maximum le silo de la chaufferie (afin de minimiser les

transports, et de pouvoir automatiser le plus de tâches possibles), les infrastructures devront se rapprocher au maximum des zones cibles.

### 3.3 Acceptabilité [P]

#### 3.3.1 Éolien

Une fois un projet éolien viable énergétiquement parlant, il faudra s'assurer de l'acceptabilité du projet et de ses impacts environnementaux. En plus de ne pas pouvoir être implanté sur certaines zones protégées (Natura 2000, zones historiques, ...), le projet pourra rencontrer des difficultés même sur des zones non protégées. Cela peut notamment être dû aux éventuels impacts sur les populations. Tout d'abord à propos des nuisances visuelles et sonores, (limitées à 5dB A supplémentaires le jour et à 3dB A supplémentaires la nuit, d'après [21]) ainsi que sur les activités alentours. Ces points doivent être étudiés afin de les prévenir et éventuellement afin d'envisager les moyens de compensation.

#### 3.3.2 Hydraulique

Un projet hydraulique, malgré son gros potentiel énergétique, entraîne très souvent de lourdes conséquences sociétales. En effet, des déplacements d'activités et de populations peuvent être à prévoir. Il faut donc garder cette contrainte en tête et estimer les éventuelles réparations que nécessitera le projet.

De plus, un aménagement hydraulique s'accompagne dans la plupart des cas de problématiques environnementale. Tout d'abord, une eutrophisation des sols est fortement probable et impactera chimiquement la région. Ensuite, la modification des cours d'eau impactera les activités de pêches, ainsi que la vie des poissons et des mammifères locaux. Des ouvrages annexes pourraient être à envisager (notamment des passes à poissons).

#### 3.3.3 Méthanisation

Un ouvrage de méthanisation peut imposer des nuisances olfactives. En effet, les effluents en décomposition peuvent émettre odeurs fortes, ce qui peut compromettre le bien-être des populations alentours. C'est le cas lorsque les déchets utilisés proviennent d'activités industrielles ou d'élevages. Ce point est à garder en tête lors du choix de la zone d'implantation et de celui de la ressource.

#### 3.3.4 Énergie solaire

L'acceptabilité des panneaux photovoltaïques dépendra majoritairement de la forme choisie pour l'exploitation. À Rignieux-le-Franc, des consultations auprès des populations ont notamment montré de fortes oppositions aux "champs photovoltaïques". En revanche, les agriculteurs et les populations semblent plutôt ouverts à l'implantation d'agrivoltaïsme.

## 4 Modèle climatique

### 4.1 Vent, Pression, Température : l'open-data de Météo-France [T]

*À toutes fins utiles, le code Python correspondant à cette partie est joint au rapport (sans les données, trop lourdes).*

Pour les calculs sur les rendements de l'éolien en particulier, il a fallu trouver des données

sur la vitesse du vent, la pression atmosphérique et la température à proximité de Rignieux-le-Franc.

**Extraction des données et choix de la station météo** Pour cela, nous avons utilisé les données disponibles en accès libre de Météo-France, au travers de la plate-forme Open Data du gouvernement [22]. Ces données sont fournies au format CSV, au travers d'entrées pour chaque station, chaque horaire pour un département donné. Nous nous sommes intéressés à la période 2010-2019, car cela nous paraissait être un temps assez long pour être représentatif. Pour des raisons évidentes de complexité de modélisation, nous ne pourrons pas prendre en compte les effets du changement climatique.

La station que nous avons choisie est celle d'Ambérieu-en-Bugey [23], située à 15km du bourg de Rignieux-le-Franc. Elle est la station la plus proche. À des fins de comparaison, nous avons aussi extrait les données de la station météo de la pointe de la Hague en Normandie [24].

Cette structure de données n'est pas utilisable directement pour les calculs, et il a donc fallu restructurer les données sous une forme différente. Nous ne rentrerons pas dans les détails de cette étape qui est peu intéressante et fastidieuse. Nous obtenions, à la fin, un fichier CSV par variable associant les points de mesure à un horaire.

**Quelques graphes** Après traitement, nous pouvons obtenir un certain nombre de graphes. Certaines données, comme la température et la vitesse du vent présentées figure 4, paraissaient cohérentes et de qualité. On remarque que la vitesse du vent est très variable, et que la température évolue bien au cours de l'année comme on s'y attendrait.

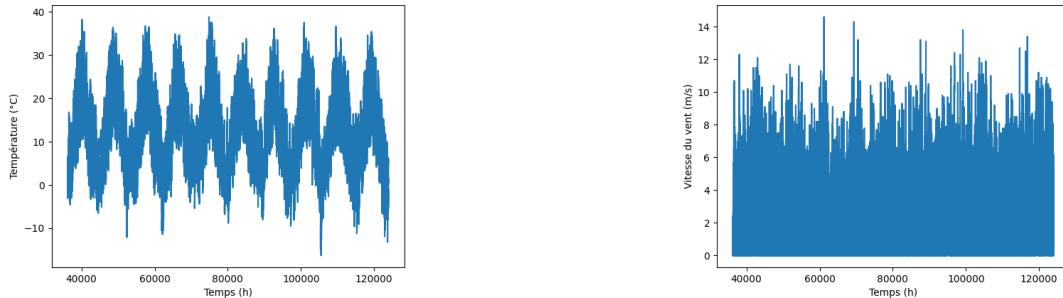


FIGURE 4 – Température et Vitesse du vent à Ambérieu-en-Bugey

D'autres variables, telles que la visibilité présentée figure 5 (calculée en interne par Météo-France) sont visiblement faussées. En regardant la fiche du poste météorologique, on remarque que le changement abrupt du graphe correspond à la mise en place d'un nouveau pyranomètre [25] (capteur de flux thermique), ce qui a probablement modifié la méthode de calcul. Cela montre que ces données, bien qu'utiles, présentent des faiblesses.

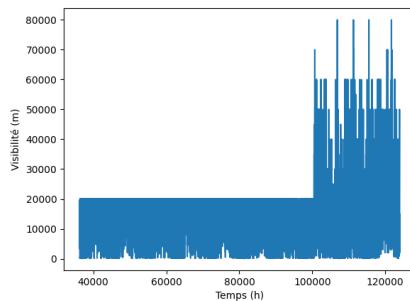


FIGURE 5 – Mesure faussée de la visibilité à Ambérieu

Les données sur le pyranomètre et donc le rayonnement solaire étant au moins en partie faussées, nous avons dû trouver une autre solution pour les simulations de production des panneaux photovoltaïques. Néanmoins, nous avions accès à la température à différentes hauteurs, à la pression atmosphérique et à la vitesse du vent, ce qui était suffisant pour les simulations de production des éoliennes.

## 4.2 Solaire [J]

La donnée cruciale pour déterminer le potentiel de production photovoltaïque à Rignieux-le-Franc est l'ensoleillement annuel. Pour estimer la production d'électricité photovoltaïque, nous avons utilisé l'outil *AutoCalSol* [26] développé par l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES). Cet outil permet de réaliser des simulations de production photovoltaïques très précises et complètes prenant en compte les aspects énergétiques (production et consommation), économiques (investissement et temps de retour) et écologiques (quantité de dioxyde de carbone économisé et temps de retour énergétique). Le détail de cet outil est présenté en annexe.

Pour la partie production photovoltaïque, cet outil se base sur PVGIS 5.1 [27], un outil et une base de données de la commission européenne. Cet outil, intégré à AutocalSol et disponible indépendamment de manière gratuite sur le site de la commission européenne, fournit des données d'ensoleillement détaillées permettant de réaliser des simulations précises de production et de rendement d'installations photovoltaïques. La figure 6 présente l'ensoleillement annuel de Rignieux-le-Franc, au pas de temps mensuel. Cependant (et c'est ce qui est utilisé dans les simulations), l'outil ne permet que de calculer l'ensoleillement à un pas de temps d'une heure.

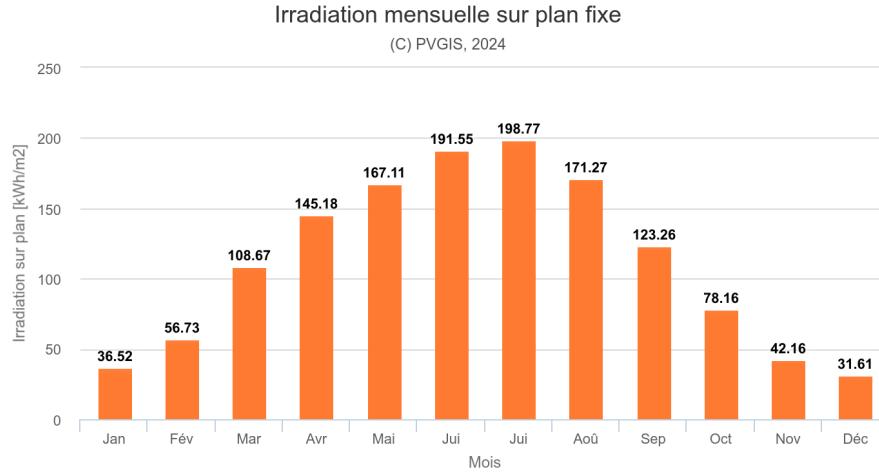


FIGURE 6 – Ensoleillement mensuel sur un an à Rignieux-le-Franc d’après PVGIS 5.1

Ces données permettent, à partir des données techniques des panneaux, des données d’orientation par rapport au sol et d’azimut (permettant de correspondre à l’implémentation réelle de panneaux solaires sur toiture) et du calcul du masque lointain (ligne d’horizon) de simuler la production électrique d’installations PV. Les données d’irradiation fournies prennent également en compte les effets de la couverture nuageuse. PVGIS fournit d’ailleurs la variabilité interannuelle de l’irradiation totale. Pour Rignieux-le-Franc, cette variabilité est de  $146,11\text{ kWh.m}^{-2}$  pour une irradiation totale de  $1351\text{ kWh.m}^{-2}$ , soit quasiment 11 %. Cette information est à garder en tête lors de l’interprétation des résultats des simulations, notamment sur la question du retour sur investissement, qui dépend directement de la quantité d’électricité produite, qui peut donc être différente dans la simulation et la réalité.

## 5 Solutions éliminées

### 5.1 Hydraulique [T]

Le Toison est la seule rivière qui traverse Rignieux-le-Franc. C’est un cours d’eau naturel, non navigable et de 15 km qui se jette dans l’Ain [28]. Son débit moyen est de  $D = 0.203\text{ m}^3/\text{s}$  [29]. Il traverse quatre communes : son parcours est visible figure 21.

Lors de notre visite du lieu, nous avons conclu qu’il n’y avait pas d’emplacement propice à une haute retenue d’eau. Pour cette démonstration, nous retiendrons un potentiel de deux mètres pour une retenue d’eau, ce qui est largement surestimé. On utilise la formule classique de puissance hydroélectrique :

$$P = \rho g H \eta D$$

On trouve, avec un rendement  $\eta = 100\%$ , une puissance disponible de  $P \approx 4\text{ kW}$ , ce qui est négligeable malgré nos hypothèses favorisantes. À titre de comparaison, cela représente deux fours électriques grand public.

De plus, les mesures du débit instantané [29] du Toison présentent des pics de débit élevé (jusqu’à  $10\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) et des phases de débit faible, voire nul, ce qui complexifie encore la mise en place d’une installation hydroélectrique (figure 7).

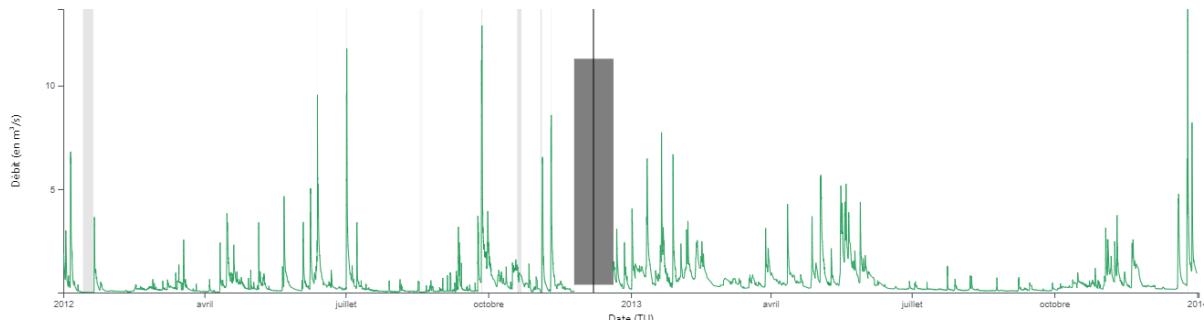


FIGURE 7 – Débit du Toison sur la commune de Rignieux-le-Franc

Nous considérons qu'au vu de la complexité de mise en place d'une telle installation est des potentiels impacts environnementaux (inondations, érosion des berges, frontière artificielle pour les animaux aquatiques), ce projet de "petite hydro" n'est pas intéressant.

## 5.2 La ferme du Giroux [P]

La commune possède quelques bâtiments de grandes dimensions intéressants pour l'installation de panneaux photovoltaïques en toiture. Parmi ces bâtiments, la ferme du Giroux semble être un cas d'étude intéressant puisqu'il est notamment d'une superficie relativement grande ( $950m^2$  environ) et faiblement ombragé.

La principale problématique de ce bâtiment est sa couverture composée d'amiante. La solution devra donc comprendre un changement de toiture en plus de la pose des panneaux photovoltaïques. Le tableau 1 ci-dessous synthétise les prix moyens d'opérations de désamiantage issus du site [30].

Étapes	Prix moyen
Diagnostic amiante	70 à 160 €
Recouvrement du toit	10 à 35 €/ $m^2$
Désamiantage	25 à 50 €/ $m^2$
Enlèvement et élimination des déchets	150 à 500 €/ tonne

TABLE 1 – Prix moyens par étapes de désamiantage

Étant donné la surface de  $950m^2$  de toiture et la masse surfacique moyenne de  $15kg.m^{-2}$  d'une toiture comme celle-ci (d'après l'ADEME), nous parvenons à un coût total pour le désamiantage de 43 917 €(comprenant le diagnostic, le désamiantage et l'élimination des déchets).

Pour ce qui est de la pose d'une nouvelle toiture, nous choisirons une toiture en tôle acier classique, dont l'installation est estimée en moyenne à 70 €/ $m^2$  [31]. Le prix pour cette étape sera de 67 000€environ.

Enfin, si l'on garde une puissance surfacique de  $200Wc.m^{-2}$ , et une surface de  $760m^2$  de panneaux solaires (en estimant que l'on recouvre 80 % de la toiture), cela permettrait l'installation de  $152kWc$ . Avec un prix moyen d'installation de  $3000\text{€}.kWc^{-1}$  (d'après [32]), on parvient à un coût pour cette étape du projet s'élevant à 456 000 €.

Au total, pour la ferme du Giroux, les coûts des travaux seront de 566 917€.

**Aspect financier [T]** La modélisation économique du projet est réalisée selon les hypothèses suivantes :

- revente de la production à 117,1 €/MWh [33]
- taux d'actualisation de 5%
- OPEX d'une valeur de 60€.kWc<sup>-1</sup> [34] (pour les installations de grand photovoltaïque dans l'usage professionnel, comprenant assurances, maintenance et certaines taxes)<sup>1</sup>
- un facteur de charge de 12.7% [36]
- durée de construction de 2 ans

L'évolution de la VAN est présentée figure 8. On remarque directement que le projet n'est pas viable. Le coût initial des travaux, très élevé, n'est jamais compensé par les gains liés à la revente électrique, de loin. Même un doublement du prix de revente ne suffit pas à approcher une VAN positive dans les 25 ans.

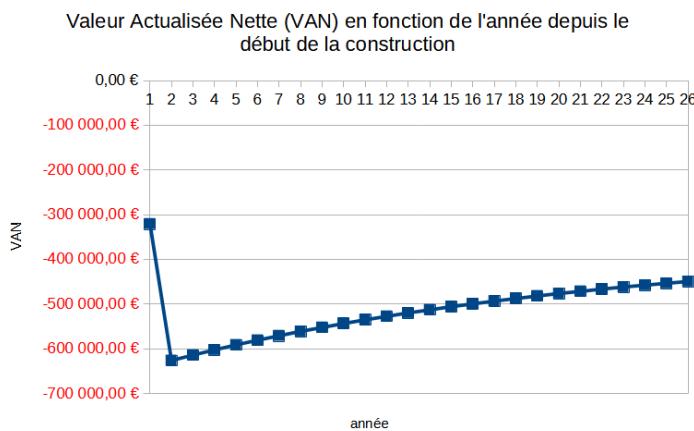


FIGURE 8 – Évolution de la VAN pour l'installation de la ferme du Giroux

### 5.3 Ombrière photovoltaïque [P]

Le seul parking de Rignieux-le-Franc est représenté sur la figure 22 jointe en annexe.

Ce parking situé en centre du bourg de la commune mesure environ 800m<sup>2</sup>, il n'est donc pas soumis à l'obligation d'installation de panneaux photovoltaïque (d'après l'article 40 de la loi ApER).

Malgré la non-obligation d'installation de photovoltaïque sur ce parking, nous avons tenu à étudier sa faisabilité. Cependant, notre visite sur site a rapidement mis en lumière la densité de la zone du parking. En effet, il est enclavé entre des arbres, des maisons, des lampadaires et un stade de ville. Ajouté à cela les très hauts coûts d'implantation, l'installation semble relativement complexe à la mise en place et ne nous semble pas être intéressante.

### 5.4 Éolien [T]

Pour connaître le potentiel de l'éolien sur la commune de Rignieux-le-Franc, nous avons simulé la production d'une éolienne qui serait implantée à proximité en utilisant les données extraites lors de la mise en place du modèle climatique de la commune.

1. Il est important de noter que des sources variées [35] montrent des disparités très fortes pour cette valeur, allant de 10€.kWc<sup>-1</sup> à 100€.kWc<sup>-1</sup> en fonction de la géographie, de la taille de l'installation ...)

La puissance générée par une éolienne se calcule selon la formule suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho_{air} S C_p v^3$$

$C_p$  est le coefficient de performance de l'éolienne. Pour une éolienne parfaite, il est de 0.59 en raison de la limite de Betz [37].  $S$  est la surface balayée par les pales de l'éolienne. Nous avions donc besoin de calculer deux données : la vitesse du vent au moyeu de l'éolienne  $v$  et la densité de l'air au moyeu de l'éolienne  $\rho_{air}$ .

Dans notre cas, nous avons pris une éolienne d'une puissance maximale de 2MW faisant 100m de haut (au moyeu) avec des pales de 40m de longueur [38].

**Densité de l'air au moyeu de l'éolienne** Nous avons fait l'hypothèse que la densité de l'air ne dépendait pas de l'humidité (car nous ne pouvions pas l'obtenir à la hauteur du moyeu). Pour commencer, nous avions besoin de la pression de l'air à l'altitude de l'éolienne. La formule suivante [39] est utilisée par certains constructeurs d'éoliennes pour l'approcher :

$$P_{h_2} = P_{h_1} \left( \frac{L_b}{T_1} (h_2 - h_1) \right)^{\frac{-g M_{air}}{R L_b}}$$

Ici,  $L_b$  est le gradient thermique vertical atmosphérique standard [40]  $-0.0065 K.m^{-1}$ ,  $h_2$  et  $h_1$  sont les hauteurs considérées,  $T_1$  est la température à  $h_1$ ,  $R$  est la constante universelle des gaz parfaits  $8.31432 J.K^{-1}.mol^{-1}$ ,  $M_{air}$  est la masse molaire de l'air  $0.0289644 kg.mol^{-1}$ .

Ensuite, partant de cette pression, nous avons pu obtenir la densité de l'air à l'aide de la formule de l'air sec [41] :

$$\rho = \frac{p}{R_{spec}(T_1 - L_b(h_2 - h_1))}$$

On obtient alors, pour la période 2010-2019, la courbe présentée figure 9. Les valeurs paraissent cohérentes, puisque la densité de l'air à  $20^\circ C$  sous la pression atmosphérique est de  $1.204 kg.m^{-3}$ .

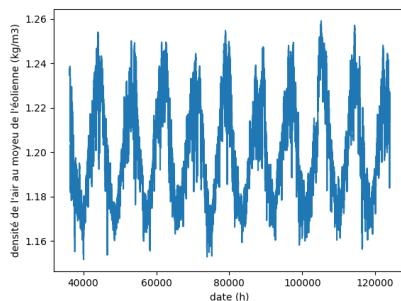


FIGURE 9 – Densité de l'air au moyeu de l'éolienne

**Vitesse du vent au moyeu de l'éolienne** Pour calculer la vitesse du vent au moyeu de l'éolienne, nous nous sommes basés sur la formule du gradient vertical utilisant un coefficient dépendant de la rugosité de la topographie [42].

$$v = v_0(H/H_0)^\alpha$$

On fixera  $\alpha = 0.15$ , ce qui correspond à une prairie. Nous obtenons alors les courbes figure 10 (à gauche, en fonction du temps, et à droite sous forme d'histogramme).

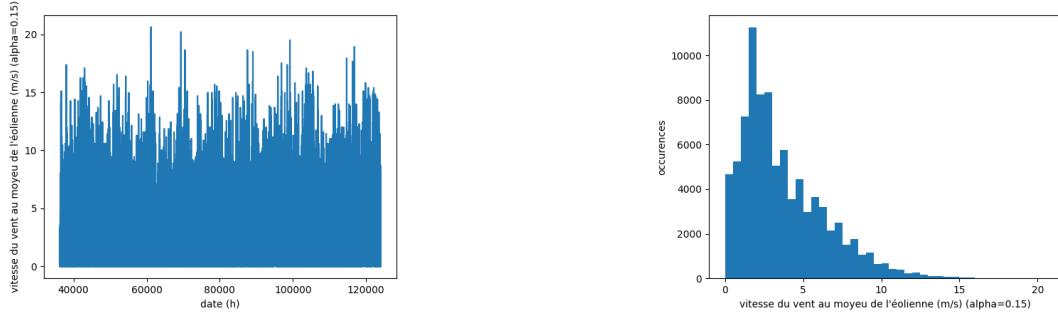


FIGURE 10 – Vitesse du vent au moyeu de l'éolienne

On voit que l'histogramme des vents correspond bien à une distribution de Weibull [43], couramment utilisée pour modéliser le vent (figure 27).

**Puissance générée par l'éolienne** Avant de calculer directement la puissance générée par l'éolienne et l'intégrer pour obtenir les MWh produits, il faut prendre en compte deux effets de seuil :

- en dessous d'une certaine vitesse du vent, l'éolienne ne produit rien
- au-dessus d'une certaine vitesse du vent, l'éolienne passe en mode "sécurité".

Nous ne prendrons pas en compte le *Yaw Rate*, qui est la vitesse de rotation de l'éolienne pour être face au vent, mais c'est une évolution envisageable pour le simulateur [44].

En ajoutant ces deux contraintes, on obtient le graphe figure 11.

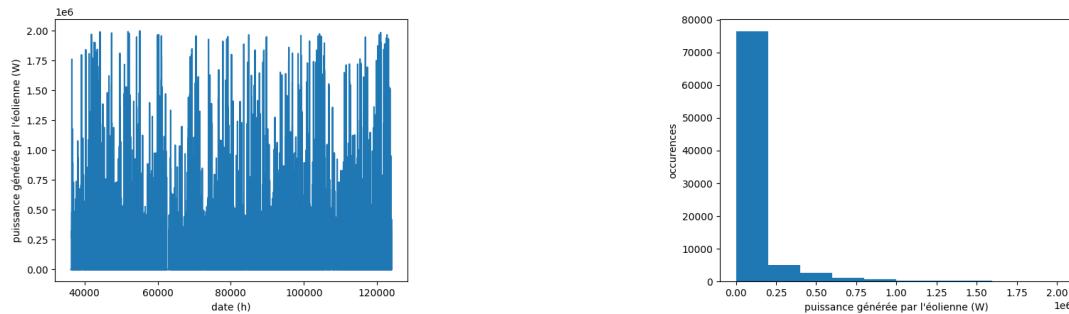


FIGURE 11 – Puissance générée par l'éolienne à Ambérieu

**Résultats et interprétation** Pour comparaison, les résultats pour la même éolienne installée à la pointe de la Hague sont présentés figure 12.

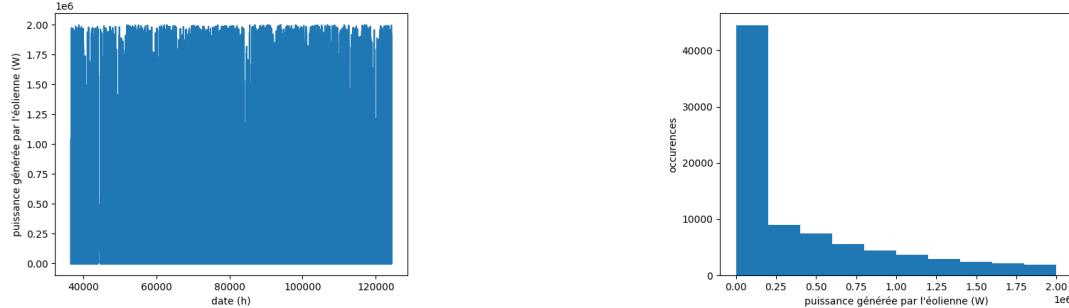


FIGURE 12 – Puissance générée par l'éolienne à la pointe de la Hague

Ensuite, en intégrant ces résultats au cours du temps, on obtient l'énergie générée par l'éolienne par an (tableau 2).

Lieu	Énergie (MWh / an)	Facteur de charge
Ambérieu	539	2.75 %
Pointe de la Hague	3468	20 %

TABLE 2 – Énergie générée par l'éolienne par an en moyenne sur 10 ans

On remarque directement que l'éolienne installée à Ambérieu (proxy de Rignieux-le-Franc) produit presque sept fois moins que celle installée à la pointe de la Hague, d'autant que l'éolienne de la Hague se met très fréquemment en mode "sécurité". Le facteur de charge de l'éolienne située à Ambérieu est extrêmement faible (en dessous de 3%) tandis que celui de la Pointe de la Hague est aux alentours de la moyenne basse française [45] (ce qui est cohérent, car elle est sous-dimensionnée).

Nous rappelons que la modélisation est déjà favorable à l'éolien (pas de *Yaw Rate*,  $C_p$  élevé), ce qui ajoute à la faiblesse de la production à Ambérieu.

**Modélisation financière** A priori, planter de l'éolien à Rignieux-le-Franc est donc une mauvaise idée. Pour s'assurer de cela, nous faisons une rapide modélisation économique. Les principales hypothèses de cette modélisation sont reprises de la source [46], à part le taux d'actualisation qui est un des taux de référence souvent retenus par l'ADEME [47] :

- revente de la production à 65 €/MWh
- taux d'actualisation de 5%
- 1.93 M€ de CAPEX
- OPEX d'une valeur de 3% du CAPEX
- durée de construction de 2 ans

Nous pouvons alors comparer les deux valeurs actualisées nettes (VAN) d'une éolienne implantée à Ambérieu ou à la Pointe de la Hague (figure 13). On remarque directement que la VAN de l'éolienne implantée à Ambérieu ne sera jamais positive : chaque année, les entrées sont inférieures aux sorties. L'éolienne de la Hague donne une VAN positive entre 24 et 25 années depuis le début du projet.

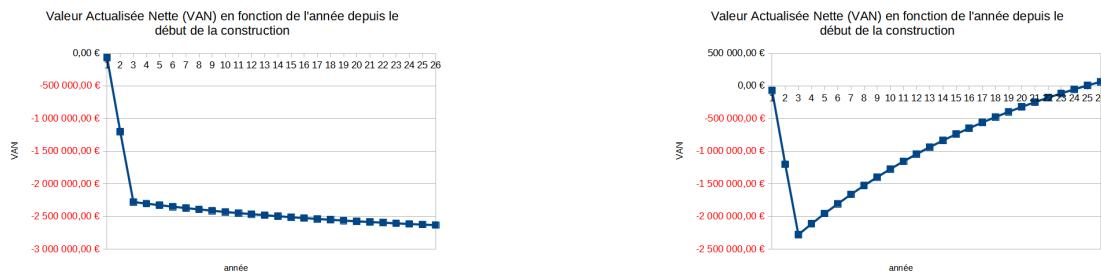


FIGURE 13 – Valeurs actualisées nettes des deux éoliennes

Nous en concluons que Rignieux-le-Franc, au travers du proxy d'Ambérieu, n'est pas propice à la production éolienne.

## 6 Solutions retenues et prévisions

### 6.1 Cartographie globale des solutions étudiées (échelle de la commune) [P]

La carte 14 ci-dessous synthétise les solutions retenues (à l'exception des solutions d'installation de systèmes solaires thermiques et photovoltaïques destinées aux particuliers).

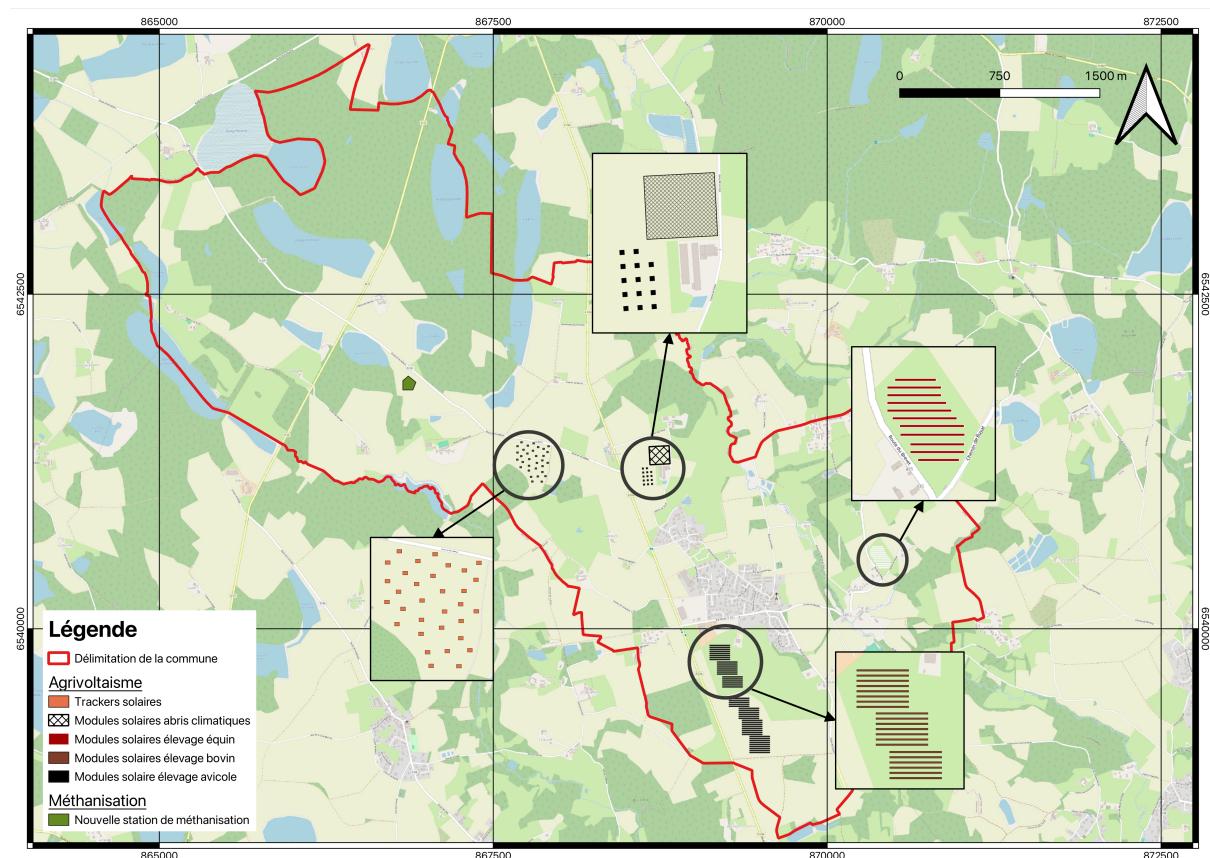


FIGURE 14 – Implantations des différentes solutions retenues

## 6.2 Solution par solution (technique, finance, énergétique)

### 6.2.1 Agrivoltaïsme [P]

*Les propositions qui suivront ne prétendent pas être les plus optimales, ni les uniques solutions envisageables. Elles auront pour but de donner des idées de ce qu'il est réalisable en fonction des contraintes auxquelles la commune fait face.*

Notre étude utilise autant que possible des données constructeurs et issues des retours d'expérience. Cependant, certaines technologies ne sont pas transparentes sur les caractéristiques techniques dont elles disposent. Lorsque cela était nécessaire, nous avons utilisé des valeurs moyennes, notamment pour la puissance surfacique des panneaux photovoltaïque, que nous avons pris en moyenne égale à  $200Wc.m^{-2}$ .

**En élevage** Une fois les différentes zones de contraintes éliminées à l'aide des cartographies, les zones mises en avant sur la carte 18 restent disponibles pour l'implantation d'agrivoltaïsme en élevage.

Intéressons-nous tout d'abord à la parcelle dédiée à l'aviculture. D'après le retour d'expérience existant (voir le document [48]), il semblerait que la technologie d'ombrières surélevées soit compatibles et intéressantes pour ce type d'élevage, nous nous concentrerons donc sur cette solution. Pour satisfaire les contraintes techniques décrites dans le tableau 7, nous préconisons un positionnement des ombrières à 1.80m de haut. De plus, afin de rester en dessous des 15 % de surface réglementaire, l'installation ne comportera pas plus de  $3360m^2$  de panneaux solaires. En s'assurant de positionner les modules au moins à 30 mètres du poulailler et en les écartant d'au moins une largeur de module chacun, nous arrivons finalement à l'implantation de **14 modules de  $100m^2$  chacun**, qui respecte effectivement le maximum toléré.

Ce choix de technologie et de positionnement permettrait l'installation de  $280kWc$  de puissance photovoltaïque (en suivant l'hypothèse que la technologie solaire utilisée dispose d'une puissance surfacique de  $200Wc.m^{-2}$ ). Il est intéressant de noter qu'une tolérance sur les restrictions liées à l'utilisation des zones agricoles strictes (un paragraphe sur ces zones est détaillé en annexe) permettrait de doubler la surface de panneaux photovoltaïques pour la parcelle avicole (et donc d'installer  $560kWc$  de puissance photovoltaïques).

Pour ce qui est de la zone de pâturage bovin concernée, le retour d'expérience (détailé dans le document [48]) préconise l'implantation de tables fixes pour les pâturages bovins. La parcelle mesure environ  $240000m^2$ , ce qui impose un maximum théorique de panneaux solaires de  $72000m^2$ . La hauteur minimale sera de 1.80m, ce qui laissera une marge suffisante afin d'éviter les blessures et les ségrégations entre les individus. En nous rendant sur site, nous avons pu remarquer la présence d'arbres au centre de la zone de pâturage empêchant l'implantation de panneaux solaires sur cette zone précise. Finalement, en espacant de deux largeurs chacune des rangées de tables photovoltaïques (mesurant chacune 5 mètres de largeur), et en laissant suffisamment d'espace de manœuvre pour les engins agricoles autour de ces dernières, nous proposons l'implantation de 49 rangées de 150 mètres de long, soit un total de  $36750m^2$  (largement en dessous du maximum conseillé). Cette configuration permettrait l'installation de  $7350kWc$  environ (en gardant la même hypothèse sur la puissance de la technologie solaire utilisée). De même que pour la parcelle avicole, cette installation pourrait être agrandie en accordant une tolérance sur la zone agricole stricte. Une augmentation de 30 % de la surface en panneaux solaires pourrait être envisagée d'après nos estimations, soit une augmentation de  $2200kWc$  environ.

L'implantation agrivoltaïque sur la parcelle d'élevage équestre sera similaire à celle du pâturage bovin détaillé ci-dessus. Cependant, les panneaux seront positionnés plus hauts (2.2m)

afin de respecter la contrainte de bien-être/sécurité animale. De plus, notre parcelle étant plus petite, les surfaces de panneaux solaires autorisées seront plus faibles. En effet, la parcelle mesurant  $31\ 583m^2$ , nous ne pourrons planter au maximum  $9474m^2$  de panneaux solaires (30 % de la superficie totale). En respectant un espacement de deux largeurs entre chaque rangée de tables, et en laissant une marge de manœuvre suffisamment grande pour la circulation des engins agricoles en bordure des modules, nous aboutissons à l'installation de  $5900m^2$  de tables photovoltaïques environ. Cette configuration permettrait l'installation de  $1180kWc$  environ (en conservant l'hypothèse faite plus haut sur la puissance de la technologie solaire utilisée).

Les trois implantations précédentes seront orientées en direction du sud, incliné à  $35^\circ$  par rapport à l'horizontale, ce qui permettra un ensoleillement optimal et maximisera donc la production.

N'ayant de retours d'expériences chiffrés sur les coûts d'installation pour les trois technologies présentées précédemment, il est assez difficile d'estimer des coûts d'installation. En revanche, si l'on se base sur les coûts d'installations moyens de centrales au sol qui avoisinent les  $800\text{€}$  par  $kWc$  installés d'après la Commission de Régulation de l'Énergie (voir le document [49]), il est possible d'avoir un ordre de grandeur des coûts d'installation (détailés dans le tableau 3 ci-dessous).

Parcelle concernée	Puissance installée ( $kWc$ )	Coût d'installation (€)
Aviculture	280	224 000
Pâturage bovin	7350	5 880 000
Pâturage équin	1195	956 000

TABLE 3 – Récapitulatif des puissances installées et des coûts d'installation pour l'agrivoltaïsme sur les parcelles d'élevages

Ces coûts élevés restent des ordres de grandeur et seront à préciser auprès d'entreprises installatrices.

**En culture** Les zones agricoles dédiées à la culture céréalières disponibles malgré les contraintes détaillées sur la carte 2 restent nombreuses. En revanche, si l'on étudie la carte des lignes électriques installées (voir carte 17), on remarque que toutes les zones ne sont pas desservies de manières égales. C'est vis-à-vis de ce critère que nous choisirons d'étudier plus en profondeur les deux parcelles agricoles mise en avant sur la carte 20 en annexe.

Étant donné les types de cultures présents à Rignieux-le-Franc (culture de blé et de maïs), nous nous proposerons d'étudier deux solutions qui offrent le plus de retour d'expérience, et qui répondent au mieux aux contraintes détaillées plus haut dans la partie 3.2 :

- les abris climatiques/canopées solaires (voir l'image 28)
- les trackers solaires biaxiaux sur piliers (voir la figure 29)

La solution d'abris climatique sera étudiée pour la parcelle 1 représentée sur la figure 20 en annexe. Cette parcelle mesure environ  $58000m^2$  et pourra donc accueillir  $26100m^2$  de panneaux solaires au maximum selon les recommandations de l'entreprise TSE Energy (qui préconisaient l'implantation d'une surface de panneaux solaires n'excédant pas 45 % de la surface totale de la parcelle). Aussi, afin de permettre le passage des engins agricoles, une hauteur de  $5m$  sera retenue. Si l'on prend pour exemple la technologie d'abri climatique de la société TSE Energy, cette dernière nous permettrait l'implantation de  $9000m^2$  de panneaux environ, en prenant soin de garder des marges de chaque côté de l'installation afin de permettre la manœuvre des engins agricoles. Dans cette configuration, l'installation permettrait l'ajout de  $1800kWc$ . Une solution

de ce type a déjà été installée, un financement de 800 000€ a été déployé pour l'installation de 2,9MWc (voir [50]). Nous retenons cet ordre de grandeur pour notre solution et obtenons un coût de **496 552€** pour l'installation de 1800kWc.

Pour la parcelle 2, représentées sur la figure 20 en annexe, nous retenons la solution d'implantation de trackers. En effet, malgré des coûts relativement élevés de cette solution, elle permet de minimiser l'empreinte au sol, et donc l'impact sur les cultures. Notre étude s'appuiera sur la solution proposée par la société OKWind (voir [51]), qui est l'une des entreprises offrant le plus d'informations techniques et économiques sur ses solutions. La parcelle étudiée mesure  $80000m^2$  environ, elle permettrait l'implantation de 64 trackers au maximum(en appliquant le critère de 8 à 10 trackers par hectare déjà évoqué plus haut). Si l'on fixe une implantation hypothétique de 32 trackers, cela permettrait l'ajout de  $3760m^2$  de panneaux et donc une puissance 704kWc. En revanche, étant donné l'emprise au sol de  $6,25m^2$  par tracker, cela entraînerait une perte de surface au sol de  $200m^2$ . D'après le retour d'expérience d'agriculteurs ayant installé la technologie de trackers de la société OKWind, le coût total d'installation d'un tracker (terrassement et maçonnerie compris) serait d'environ **57 000€**. Si l'on installait effectivement 32 trackers, cela reviendrait donc à un coût total de 1 824 000 €

**Aspect financier [T]** Dans un souci d'allègement du rapport, nous étudierons l'aspect financier de seulement une installation : celle du pâturage bovin, d'une puissance installée de 7350kWc pour un coût d'installation de 5880000€ sans aides. Les hypothèses sont les mêmes que dans la partie La ferme du Giroux [P], sauf pour les valeurs suivantes :

- revente de la production à 100 €/MWh ([33] ne donne pas de chiffre pour une installation de cette taille, qui dépendra de contrats régionaux, mais cela correspondrait à la tendance dégagée par le tableau)
- durée de construction de 1 an

L'évolution de la VAN est alors montrée figure 15. On notera que le projet devient rentable entre 25 et 26 années après la construction en prenant en compte le taux d'actualisation de 5%, ce qui est cohérent. Lors de nos essais, ce temps de retour sur investissement était extrêmement sensible, en particulier aux OPEX : il conviendra alors de remplacer ces valeurs lorsqu'un devis sera établi par un professionnel.

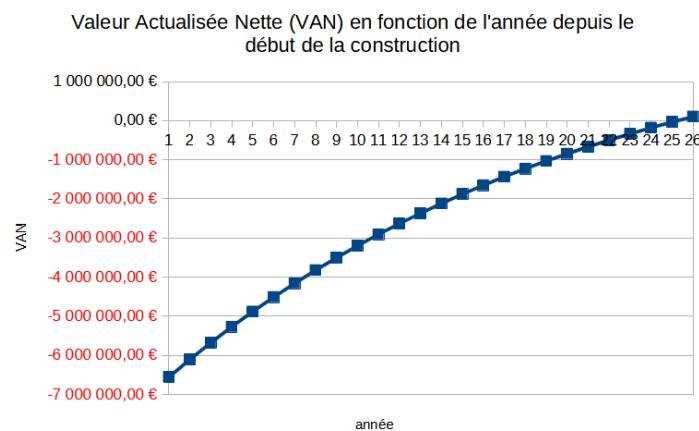


FIGURE 15 – Évolution de la VAN pour l'installation PV bovine

### 6.2.2 Photo-voltaïque sur toitures individuelles [J]

Les panneaux photovoltaïques ont l'avantage de pouvoir être facilement installés sur les toitures des maisons individuelles, c'est pourquoi l'étude détaillée des possibilités d'installations de tels dispositifs sur les toitures de Rignieux-le-Franc constitue un point important de notre étude.

**Intégration des panneaux** La majorité des maisons du village sont orientées selon deux axes, soit Nord/Sud, soit Est/Ouest. Étant donné l'impact important que l'orientation a sur la production électrique des panneaux, les deux orientations ont été étudiées indépendamment. Dans le cas des maisons orientées Nord/Sud, l'installation de panneaux se fera uniquement sur la partie Sud de la toiture, tandis que sur les maisons orientées Est/Ouest, les possibilités d'installation d'un côté, de l'autre et repartie entre les deux a été étudiée. Les deux configurations sont visibles sur la figure 23.

La pose des panneaux peut se faire de deux manières différentes : intégrée au bâti ou en surimposition. Là où la surimposition consiste simplement à poser et à fixer l'ensemble de panneaux sur une structure métallique reposant sur le toit préalablement existant, la pose intégrée au bâti consiste en une intégration totale du système photovoltaïque à la structure du toit.

Cette option a été écartée dans cette étude, considérant qu'elle n'est pertinente généralement que sur des projets de construction d'habitation, et non pas d'installation de panneaux a posteriori, où elle nécessite des travaux d'installation bien plus conséquents, et plus chers. De plus, que la pose soit faite en surimposition ou en intégration au bâti ne change strictement rien à la production électrique finale à surface de panneaux équivalente. Dans l'optique de fournir un guide utile aux habitants souhaitant installer des panneaux photovoltaïques sur leur toiture, seule la surimposition nous a semblé pertinente.

Concernant les puissances installées, afin de rester raisonnable quant à l'investissement, la place disponible sur les toitures et la puissance installée par rapport à la consommation d'un foyer, seuls des scénarios de 3 et 6kW ont été considérés. Cela correspond à des surfaces de panneaux respectives de 15 et 30 m<sup>2</sup>.

Ensuite, considérant que tous les habitants de Rignieux-le-Franc sont reliés au réseau de distribution d'électricité, l'option d'installer des batteries domestiques dans le but de lisser la production des panneaux n'a pas été retenue, au profit de solutions raccordées au réseau. Dès lors, deux types de contrat existent avec EDF OA pour le raccordement d'installations photovoltaïques : l'autoconsommation avec revente du surplus et la revente totale. Le détail de ces deux types de contrat est donné dans la suite.

**Contrat, subventions et raccordement** Concernant le type d'abonnement électrique, dans une démarche de représenter le cas le plus général possible, nous avons considéré uniquement l'hypothèse d'un foyer ayant souscrit à un contrat au tarif bleu d'EDF, sans heure pleines ni heures creuses, à 0,2516 €/kWh.

Dans le cas de la revente totale, l'abonné revend la totalité de sa production et paye l'intégralité de sa consommation à travers deux contrats différents. Dans le cas de l'autoconsommation avec revente du surplus, l'abonné soutire au réseau la puissance complémentaire entre son besoin et sa production, et vend le surplus sur le réseau le cas échéant.

Les tarifs de rachat sont différents dans les deux cas. Dans le cas de la revente totale, le tarif de rachat est, au premier trimestre 2024, de 0,1735 €/kWh pour les installations de

puissance inférieure ou égale à 3 kWc et de 0,1474 €/kWh pour les puissances comprises entre 3 et 9 kWc. Dans le cas de la revente du surplus pour l'autoconsommation, le tarif est de 0,13 €/kWh pour les puissances inférieures à 9 kWc.

Les primes et les aides disponibles à l'installation diffèrent en fonction du type de contrat. Il n'existe pas d'aide particulière et systématique pour une installation en revente totale. Cependant, il existe une prime à l'autoconsommation, dégressive, de 370 €/kWh pour les puissances inférieures ou égales à 3 kWc et de 270 €/kWc pour les puissances allant de 3 (exclu) à 9 kWc (inclus). Cette prime est versée par EDF et n'est accessible que pour les systèmes mis en place par un installateur Reconnu Garant de l'Environnement (RGE). Le montant des primes est fixé par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE).

**Coûts d'installation** Les coûts d'installations (CAPEX) de panneau PV sur toiture en surimposition sont impossibles à prédire avec exactitude, mais les estimations de HelloWatt [52] donnent :

Puissance	Estimation basse	Estimation haute
3 kWc	8500 €	10500 €
6 kWc	12000 €	17000 €
9 kWc	17000 €	23000 €

Les coûts de maintenance (OPEX) sont eux estimés à 15 à 20 % du montant du CAPEX, soit environ 1500 € pour 3 kWc et 2700 € pour 6 kWc, en cumulé sur la durée de vie de l'installation.

**Simulations & Résultats** Pour les simulations, huit scénarios ont été étudiés, correspondant à des orientations et des puissances installées différentes. Le scénario Est\_Ouest\_6kW correspond à un scénario dans lequel la moitié des panneaux sont orientés plein Est et l'autre moitié plein Ouest. Le simulateur prend un grand nombre de paramètres en entrée. Certains sont les communs à toutes les simulations, ils sont détaillés dans le tableau 4.

<b>Inclinaison toiture</b>	35°
<b>Technologie PV</b>	Si Cristallin
<b>Indice de performance</b>	87 %
<b>Consommation annuelle</b>	7800 kWh
<b>Durée de vie de l'installation</b>	20 ans
<b>Inflation annuelle du cout de l'électricité</b>	3 %
<b>Pays d'origine des panneaux</b>	France

TABLE 4 – Paramètres constants pour toutes les simulations

Ensuite, les paramètres variant pour chaque simulation (chaque scénario) sont détaillés dans le tableau 5.

Scénario	Orientation	Puissance crête (kW)	CAPEX (€)	OPEX (€)	Prime & subvention (€)	
					Revente totale	Autoconso
Sud_3kW	Sud	3	8500	1500	399	1110
Sud_6kW	Sud	6	14500	2700	798	1680
Sud_9kW	Sud	9	19000	3600	1197	2520
Est_3kW	Est	3	8500	1500	399	1110
Est_6kW	Est	6	14500	2700	798	1680
Ouest_3kW	Ouest	3	8500	1500	399	1110
Ouest_6kW	Ouest	6	14500	2700	798	1680
Est_Ouest_6kW	Est/Ouest	6 (3+3)	14500	2700	798	1680

TABLE 5 – Table des variables d’entrée du simulateur

Enfin, le simulateur donne en sortie un certain nombre de données, disponibles dans le tableau 6.

Scénario	Production (kWh/an)	TRA (années)		Emprunte Carbone CdV (gCO2/kWh)	EPBT (années)
		Vente totale	Autoconso		
Sud_3kW	3843	14	9	26,38	1,48
Sud_6kW	7695	14	10	26,38	1,48
Sud_9kW	11535	12	9	26,38	1,48
Est_3kW	3094	18	11	32,77	1,84
Est_6kW	6191	18	11	32,77	1,87
Ouest_3kW	3034	19	11	33,32	1,87
Ouest_6kW	6064	18	11	33,32	1,87
Est_Ouest_6kW	6127,9	18	11	33,045	1,88

TABLE 6 – Table des sorties du simulateur. (TRA : Temps de retour actualisé, identique au temps de retour sur investissement)

Les résultats des simulations permettent de conclure un certain nombre de choses. D’abord, peu importe l’orientation de la maison (Est/Ouest ou Nord/Sud), les temps de retour sur investissement sont globalement similaires et autour de la dizaine d’années pour l’autoconsommation, de la quinzaine pour la revente totale. De plus, peu importe la puissance installée, le temps de retour sur investissement est globalement le même, seuls les CAPEX, OPEX et rentes varient, mais se compensent, même sur des puissances supérieures comme le montre la simulation sur 9kWc.

Ensuite, la revente totale est une option à exclure. Elle offre moins d’avantages économiques (de primes), produit une rente plus faible (voir les pdf fournis par le simulateur dans le dossier annexe) et un temps de retour sur investissement significativement plus long.

Dans tous les cas, le temps de retour énergétique est court, inférieur à deux ans (soit moins de 10 % de la durée de vie de l’installation) et l’intensité carbone de l’électricité produite, sur l’ensemble du cycle de vie, est faible : entre 26 et 33g/CO2/kWh, soit dans la moyenne de l’électricité française.

Concernant la sensibilité à différents paramètres, d’autres simulations ont été menées avec un azimut légèrement dévié par rapport au Sud (de 10° à l’Ouest), avec des orientations de toitures différentes (30° et 40°) et avec des panneaux solaires chinois plutôt que français. Ces quatre études sont disponibles dans le dossier annexe. En conclusion, les résultats ne présentent aucune différence significative sauf dans le cas où les panneaux français sont remplacés par des panneaux chinois, l’intensité carbone de l’électricité produite passant de 26 gCO2/kWh à 46,9 gCO2/kWh.

Lors des discussions avec le commanditaire, une des questions importantes était de savoir si, dans le cas d’une maison avec deux pans de toit orientés Est/Ouest, il était utile de séparer

l'installation pour exposer la moitié des panneaux à l'Est et l'autre à l'Ouest de manière à profiter d'un ensoleillement maximal. D'un point de vue économique comme écologique, les simulations ne montrent aucun intérêt significatif à cette idée.

Enfin, il est important de noter que les résultats présentés par les simulations restent des estimations. En effet, dû à une variabilité annuelle d'environ 11 % de l'ensoleillement à Rignieux-le-Franc, il est impossible de prédire avec exactitude les grandeurs ici simulées. Cependant, il est tout de même possible de conclure que l'installation de panneaux photovoltaïques sur les toitures du village est très intéressante, tant d'un point de vue écologique qu'économique.

### 6.2.3 Le solaire thermique [P]

Tout comme l'installation de panneaux photovoltaïque en toiture, Rignieux-le-Franc semble apte à accueillir de l'énergie solaire thermique. Pour rappel, l'ADEME préconise l'installation de  $4m^2$  de capteurs solaires par foyer de 4 personnes dans le nord de la France et de  $2m^2$  de capteurs solaires par foyer de 4 personnes dans le sud de la France. Nous choisissons de nous placer dans l'hypothèse la plus défavorable et de conserver le chiffre de  $4m^2$  de capteurs solaires par foyer de 4 personnes.

### 6.2.4 Méthanisation [P]

Nous suivrons l'hypothèse suivante : 500 Ha de cultures permettraient l'approvisionnement en gaz de 13 000 personnes. D'après le commanditaire, les déchets agricoles d'environ 470 Ha de culture ne sont pas valorisés. La contrainte d'approvisionnement semble donc respectée, avec un approvisionnement exclusivement issu de la commune qui plus est. L'ajout d'une seconde centrale de méthanisation au sein de la commune semble tout à fait faisable et permettrait de fournir en gaz environ **12 200 personnes** selon le modèle de la première centrale réalisée. Afin de simplifier l'insertion au réseau de gaz de cette seconde unité, il pourrait être intéressant de la positionner relativement proche de la première.

**Aspect financier [T]** Nous avons tenté de modéliser la rentabilité d'un méthaniseur, mais il faut garder en tête que les technologies sont nombreuses, avec des objectifs principaux variés (gaz de ville, électricité, chaleur) dépendant de facteurs complexes (type de cultures à valoriser, prestataire choisi pour la construction, tuyaux de gaz existants, etc.). De plus, trouver des chiffres cohérents sur les coûts et prix est particulièrement difficile en raison de cette variabilité. En particulier, les aides octroyées sont quasiment au cas par cas. La modélisation de cette énergie sous tous ces aspects pourrait constituer un projet à part entière.

On peut néanmoins tenter de dimensionner grossièrement cette centrale : si on considère que la centrale peut fournir 12 200 personnes en gaz, qu'un foyer est constitué de 2.17 personnes [53] et qu'un foyer consomme en moyenne  $11500kWh.an^{-1}$  de gaz [54], on obtient que la centrale doit produire  $671Nm^3.h^{-1}$  ( $Nm^3$  signifie normo-mètre cube : un mètre cube de gaz à pression atmosphérique et température normalisée). Cela rend cette centrale de méthanisation comparable à celle de Montbazens par exemple, qui fournit  $700 Nm^3.h^{-1}$  [55]. Pour comparaison, la centrale de Montbazens a demandé  $24M\text{€}$  d'investissements, dont  $7.5M\text{€}$  d'aides. Le coût élevé de cette installation est justifié par le fait qu'elle soit imaginée pour produire, à terme,  $1280Nm^3.h^{-1}$  de gaz.

### 6.2.5 Géothermie [P]

Comme évoqué dans le paragraphe détaillant les contraintes liées à la géothermie, le principal point d'intérêt est l'estimation de la ressource. Comme on peut le voir sur les cartes 24 et

25 en annexe, le potentiel de la commune de Rignieux-le-Franc est favorable à la géothermie en circuit fermé sur la quasi-totalité de la commune. De plus, malgré le fait que les informations ne soient pas disponibles en tout point sur la commune, le potentiel de ressource semble globalement moyen pour la technologie de géothermie en circuit ouvert.

Pour aller plus loin avec la géothermie et proposer des solutions concrètes, il serait nécessaire de faire des études plus poussées (sur site notamment, pour quantifier et qualifier la ressource précisément). Cependant, nous pouvons d'ors et déjà conclure sur le fait que la géothermie semble tout à fait compatible avec Rignieux-le-Franc, et notamment la technologie de géothermie à boucle fermée, qui trouve une ressource uniforme sur tout le territoire communal.

## Conclusion [T]

Dans le contexte de la commune de Rignieux-le-Franc, nous avons étudié les différentes technologies d'énergie renouvelables et leur potentiel au travers de simulations météorologiques et d'un travail documentaire sur les spécificités d'implantation de ces différentes technologies, d'un point de vue législatif et technique.

Ensuite, nous avons fourni des recommandations correspondant à notre analyse de la situation (législation, économie, environnement ...). On peut citer notamment que nous avons identifié un fort potentiel photovoltaïque et un faible potentiel éolien.

Notre analyse de certaines énergies, comme la géothermie, a été limitée par le temps et nos connaissances et reste à approfondir.

## Bibliographie

### Références

- [1] Zaenr. <https://www.rignieux-le-franc.fr/zaenr/>. Site de la commune de Rignieux-le-Franc.
- [2] Rignieux-le-franc (01800). <https://observatoire.enedis.fr/commune/rignieux-le-franc-01325>. L'observatoire français de la transition écologique par EDF.
- [3] Equivalences des énergies bois charbon fioul gaz naturel propane. <https://picbleu.fr/les-articles/tableau-equivalences-bois-charbon-fioul-gaz-naturel-gaz-propane>. Site Picbleu.
- [4] Ign - portail cartographique enr. <https://macarte.ign.fr/carte/W3Cf8x/Portail-Cartographique-EnR>. Groupe de travail « Agrivoltaïsme » du Conseil Permanent de l'INAO.
- [5] Éolien terrestre. <https://www.ecologie.gouv.fr/eolien-terrestre>. Site du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.
- [6] Installation d'une éolienne domestique ou agricole. <https://entreprendre.service-public.fr/vosdroits/F33368>. Site officiel d'information administrative pour les entreprises.
- [7] Hydroélectricité. <https://www.ecologie.gouv.fr/hydroelectricite>. Site du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.
- [8] Biogaz. <https://www.ecologie.gouv.fr/biogaz>. Site du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.
- [9] Solaire. <https://www.ecologie.gouv.fr/solaire>. Site du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.
- [10] Obtenir de l'électricité avec des panneaux solaires (panneaux photovoltaïques). <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F31487>. Site officiel de l'administration française.
- [11] Les panneaux photovoltaïques sur parkings. <https://www.oise.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Amenagement-durable-du-territoire/Transition-Ecologique-et-Energetique/Energies-renouvelables/La-loi-d-acceleration-pour-les-energies-renouvelables/Les-panneaux-photovoltaiques-sur-parkings>. Site des services de l'état dans l'Oise (mais cette loi concerne toute la France).
- [12] Lucy Copin. Réglementations & permis de construire – installation d'ombrières photovoltaïques. <https://rossinienergy.com/reglementation-ombriere-photovoltaque/>.
- [13] Bernard MANDEVILLE et Matthieu PERRIN. Agrivoltaïsme : Tous à vos postes, le décret arrive enfin ! <https://www.drouot-avocats.fr/agrivoltaisme-tous-a-vos-postes-le-decret-arrive-enfin/>.
- [14] Agrivoltaïsme : tout savoir sur la ferme agrivoltaïque en 2023. <https://unit-e.fr/tout-savoir-agrivoltaisme/>. Site UNITe.
- [15] Installation de panneaux solaires : réglementation et démarches. <https://www.diwatt.fr/reglementation-et-demarches-pour-panneau-solaire.php>. Site : Diwatt.
- [16] Géothermie. <https://www.ecologie.gouv.fr/geothermie>. Site du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.
- [17] Optimisation poids panneau solaire pour une installation réussie. <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaïques/poids>.
- [18] Quelle est la meilleure inclinaison pour vos panneaux solaires ? <https://www.effy.fr/travaux-energetique/solaire/inclinaison-panneau-solaire>.
- [19] ADEME. Adopter le solaire thermique. <https://librairie.ademe.fr/cadic/7736/guide-adopter-solaire-thermique.pdf>, 2023. [Accessed 15-03-2024].

- [20] Quentin Barral AFPG Association Française des Professionnels de la Géothermie. Webinaire atee – afpg - quels sont les critères à prendre en compte pour estimer le potentiel d'un projet de géothermie ? [https://atee.fr/system/files/2023-05/Quels%20critÃlres%20Ã%20prendre%20en%20compte%20pour%20un%20projet%20GÃlÃoÃthermie%20dans%201%27industrie\\_0.pdf](https://atee.fr/system/files/2023-05/Quels%20critÃlres%20Ã%20prendre%20en%20compte%20pour%20un%20projet%20GÃlÃoÃthermie%20dans%201%27industrie_0.pdf), 2023. [Accessed 16-03-2024].
- [21] Commission de régulation de l'énergie. Coûts et rentabilités du grand photovoltaïque en métropole continentale. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj96tmWqIKFAxUiT6QEHUD9BYOQFnoECA8QAw&url=https%3A%2F%2Fwww.cre.fr%2Fcontent%2Fdownload%2F20543%2Ffile%2FRapport\\_couts\\_PV\\_2019.pdf&usg=A0vVaw1AZrGsEW4qhQGhF4VoYDOK&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj96tmWqIKFAxUiT6QEHUD9BYOQFnoECA8QAw&url=https%3A%2F%2Fwww.cre.fr%2Fcontent%2Fdownload%2F20543%2Ffile%2FRapport_couts_PV_2019.pdf&usg=A0vVaw1AZrGsEW4qhQGhF4VoYDOK&opi=89978449), 2019. [Accessed 01-03-2024].
- [22] Météo-France. Données climatologiques de base - horaires. <https://meteo.data.gouv.fr/datasets/donnees-climatologiques-de-base-horaires/>.
- [23] Météo-France. Fiche du poste 01089001 - ambérieu. [https://donneespubliques.meteofrance.fr/metadonnees\\_publiques/fiches/fiche\\_01089001.pdf](https://donneespubliques.meteofrance.fr/metadonnees_publiques/fiches/fiche_01089001.pdf).
- [24] Météo-France. Fiche du poste 50020001 - pte de la hague. [https://donneespubliques.meteofrance.fr/metadonnees\\_publiques/fiches/fiche\\_50020001.pdf](https://donneespubliques.meteofrance.fr/metadonnees_publiques/fiches/fiche_50020001.pdf).
- [25] Wikipédia. Pyranomètre — wikipédia, l'encyclopédie libre, 2023. [En ligne ; Page disponible le 22-novembre-2023].
- [26] Outil autocalsol de l'ines. <https://autocalsol.ines-solaire.org/>.
- [27] Outil pvgis 5.1 de la commission européenne. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/fr/#api\\_5.1](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/#api_5.1).
- [28] Sandre. Cours d'eau v2945210. [https://www.sandre.eaufrance.fr/geo/CoursEau\\_Carthage2017/V2945210](https://www.sandre.eaufrance.fr/geo/CoursEau_Carthagene2017/V2945210).
- [29] EauFrance. Hydroportail v2945210. <https://www.hydro.eaufrance.fr/sitehydro/V2945210/fiche>.
- [30] Prix travaux m2. Prix d'un d'Ésamiantage de toiture au m2 en 2024. <https://www.prix-travaux-m2.com/prix-desamiantage-toiture.php>, 2024. [Accessed 28-02-2024].
- [31] Rénovation&travaux. Prix d'une toiture en tôle au m2. [https://www.renovationettravaux.fr/prix-toiture-tôle-m2-tarifs-devis#:~:text=En%20moyenne%2C%20on%20considÃlre%20que, en%20pose%20et%20fourniture%20comprise.](https://www.renovationettravaux.fr/prix-toiture-tôle-m2-tarifs-devis#:~:text=En%20moyenne%2C%20on%20considÃlre%20que, en%20pose%20et%20fourniture%20comprise.,), 2024. [Accessed 28-02-2024].
- [32] Selectra. Panneau solaire au sol : législation, installation, prix et avis. [https://selectra.info/energie/solaire/panneau-au-sol?fbclid=IwAR2TYQtibzaq2nk1iUtdp\\_Fcd9jmH19sGApIy\\_r8tcwdNBtrqtf25qV36E#prix](https://selectra.info/energie/solaire/panneau-au-sol?fbclid=IwAR2TYQtibzaq2nk1iUtdp_Fcd9jmH19sGApIy_r8tcwdNBtrqtf25qV36E#prix), 2023. [Accessed 25-02-2024].
- [33] terre solaire. Guichet ouvert photovoltaïque à 500 kwc.
- [34] SER et Solidarité Renouvelables Enerplan. Réponse de la filière photovoltaïque à la consultation publique relative aux projets de décret et d'arrêté encadrant la renégociation des contrats photovoltaïques s06 et s10. <https://www.enerplan.asso.fr/dl-fichier-actuallite?media=40332>.
- [35] Commission de Régulation de l'énergie. Coûts et rentabilités du grand photovoltaïque en métropole continentale. [https://www.cre.fr/content/download/20543/file/Rapport\\_couts\\_PV\\_2019.pdf](https://www.cre.fr/content/download/20543/file/Rapport_couts_PV_2019.pdf).
- [36] statista. Facteur de charge moyen du parc solaire photovoltaïque par région en france en 2021.
- [37] Wikipédia. Limite de betz — wikipédia, l'encyclopédie libre, 2023. [En ligne ; Page disponible le 14-novembre-2023].
- [38] Batiproducts. Gamesa g80-2,0 mw. <https://www.batiproducts.com/fiche/produits/eloienne-de-2-mw-a-pas-variable-p69095973.html>.
- [39] Mide-Hutchinson. Pressure at altitude calculator. <https://www.mide.com/air-pressure-at-altitude-calculator>.

- [40] Wikipedia contributors. Lapse rate — Wikipedia, the free encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lapse\\_rate&oldid=1208795426](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lapse_rate&oldid=1208795426), 2024. [Online; accessed 14-March-2024].
- [41] Wikipedia contributors. Density of air — Wikipedia, the free encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Density\\_of\\_air&oldid=1210749468](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Density_of_air&oldid=1210749468), 2024. [Online; accessed 14-March-2024].
- [42] Nicolas GERARD. Mos 3.2 – Énergie éolienne - cours. [https://pedagogie3.ec-lyon.fr/pluginfile.php/94348/mod\\_resource/content/0/ECL%20MOS%203.2%20Eolien%202024.pdf](https://pedagogie3.ec-lyon.fr/pluginfile.php/94348/mod_resource/content/0/ECL%20MOS%203.2%20Eolien%202024.pdf).
- [43] Wikipédia. Loi de weibull — wikipédia, l'encyclopédie libre, 2023. [En ligne ; Page disponible le 18-janvier-2023].
- [44] M-G Kim and P H Dalhoff. Yaw systems for wind turbines – overview of concepts, current challenges and design methods. *Journal of Physics : Conference Series*, 524(1) :012086, jun 2014.
- [45] statista. Facteur de charge moyen de l'électrique éolien en france en 2021, par région.
- [46] Nicolas GERARD. Mos 3.2 – Énergie éolienne - be. [https://pedagogie3.ec-lyon.fr/pluginfile.php/94349/mod\\_resource/content/0/TD%20%C3%A9olien%20ECL%202024.pdf](https://pedagogie3.ec-lyon.fr/pluginfile.php/94349/mod_resource/content/0/TD%20%C3%A9olien%20ECL%202024.pdf).
- [47] ADEME. Coûts des énergies renouvelables en france - édition 2016. [https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2017/01/couts\\_energies\\_renouvelables\\_en\\_france\\_edition2016v1.pdf](https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2017/01/couts_energies_renouvelables_en_france_edition2016v1.pdf). [Accessed 15-03-2024].
- [48] Agri – voltaïsme et production sous siquo. COMNAT-GT-AGRIVOLTAISME-20210125-Agrivoltalisme-et-SIQO-25012021-DiffusionGT.pdf. Groupe de travail « Agrivoltaïsme » du Conseil Permanent de l'INAO.
- [49] Nicolas GERARD EDF. L'énergie éolienne. Cours suivi à Ecole Centrale de Lyon ("MOS 3.2 – Energie éolienne"), 2024. [Accessed 024-02-2024].
- [50] Ouest-France Garance HAMEON. « un tiers de nos besoins en électricité couverts par nos 3 trackers solaires ». <https://www.ouest-france.fr/normandie/canopee-agrivoltaique-dans-le-calvados-un-financement-participatif-lance-pour-recolter-800-000-euros-0db9bd7c-9286-11ee-b098-8644c47fd929>, 2023. [Accessed 28-02-2024].
- [51] Avec okwind, bénéficiez de technologies performantes pour votre installation agrivoltaïque. <https://www.okwind.fr/faq/agrivoltaisme/technologies-performantes-installation-agrivoltaïque>.
- [52] HelloWatt. Quel est le prix d'une installation solaire photovoltaïque au m<sup>2</sup>. [https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaiques/prix-panneau-solaire-m2#:~:text=Sachant%20qu%201%20m%C2%B2%20de,panneaux%20solaires%20\(9%20kWc\)](https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaiques/prix-panneau-solaire-m2#:~:text=Sachant%20qu%201%20m%C2%B2%20de,panneaux%20solaires%20(9%20kWc).).
- [53] INSEE. Taille des ménages.
- [54] HelloWatt. Quelle est la consommation moyenne de gaz en france en 2024 ?
- [55] Bioénergies-Promotion. Prometer, la plus importante unité de méthanisation du constructeur naskeo.
- [56] Contrats biogaz. <https://www.edf-oa.fr/content/contrats-biogaz>. Site d'EDF.
- [57] Axel Weselek & Andrea Bauerle & Jens Hartung & Sabine Zikeli & Iris Lewandowski & Petra Högy. Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021.
- [58] Michele Colauzzi Stefano Amaducci, Xinyou Yin. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 2018.
- [59] L'agrivoltaïsme appliqué à l'élevage des ruminants. Accédé : 14/02/2024.
- [60] FCS France Chauffage Solaire. Panneaux solaire thermique - plan vitré. <https://france-chauffage-solaire.fr/panneau-solaire-thermique-fcs-120.html>, 2023. [Accessed 15-03-2024].

- [61] Photovoltaïque.info. Entretien et maintenance du système. [https://www.photovoltaique.info/fr/exploiter-une-installation/exploitation-technique/entretien-et-maintenance/#operations\\_de\\_maintenance\\_preventive\\_a\\_realiser\\_par\\_un\\_professionnel\\_habilite](https://www.photovoltaique.info/fr/exploiter-une-installation/exploitation-technique/entretien-et-maintenance/#operations_de_maintenance_preventive_a_realiser_par_un_professionnel_habilite), Non renseignée. [Accessed 14-03-2024].

## 7 Annexes

**Note :** *Joint à ce rapport dans un dossier zippé, en plus des annexes, on pourra trouver différents fichiers correspondant par exemple au code Python de la simulation éolienne, les fichiers QGIS ou bien des classeurs Excel.*

### 7.1 Contexte détaillé

#### 7.1.1 Bâtiments communaux[C]

Il y a quatre bâtiments communaux : il s'agit de la mairie, la salle des fêtes, la bibliothèque et l'école. La chaufferie alimente par un circuit d'eau :

- la mairie, composée :
  - d'un bureau des secrétaires mesurant  $86\ m^3$  et ayant 3 radiateurs
  - d'un bureau du maire mesurant  $43\ m^3$  et ayant 1 radiateur
  - d'un bureau des adjoints mesurant  $16\ m^3$  et ayant 1 radiateur
  - d'une salle du conseil mesurant  $86\ m^3$  et ayant 4 radiateurs
- la salle des fêtes, par un échangeur eau/air pulsé, d'un volume de  $780\ m^3$ ,
- la bibliothèque mesurant  $80\ m^3$  et ayant 1 radiateur
- l'école, composée :
  - de deux classes (dans un vieux bâtiment) de  $157\ m^3$  et  $250\ m^3$  avec 2 radiateurs par classe
  - d'un bâtiment BBC, avec chauffage au sol, comportant :
    - 6 classes de  $168\ m^3$  chacune
    - 1 classe de  $148\ m^3$
    - 1 salle de motricité de  $221\ m^3$
    - 1 salle de repos de  $130\ m^3$
    - 1 salle de réunions de  $96\ m^3$
    - 1 réfectoire de  $300\ m^3$

### 7.1.2 Cartographies[P]

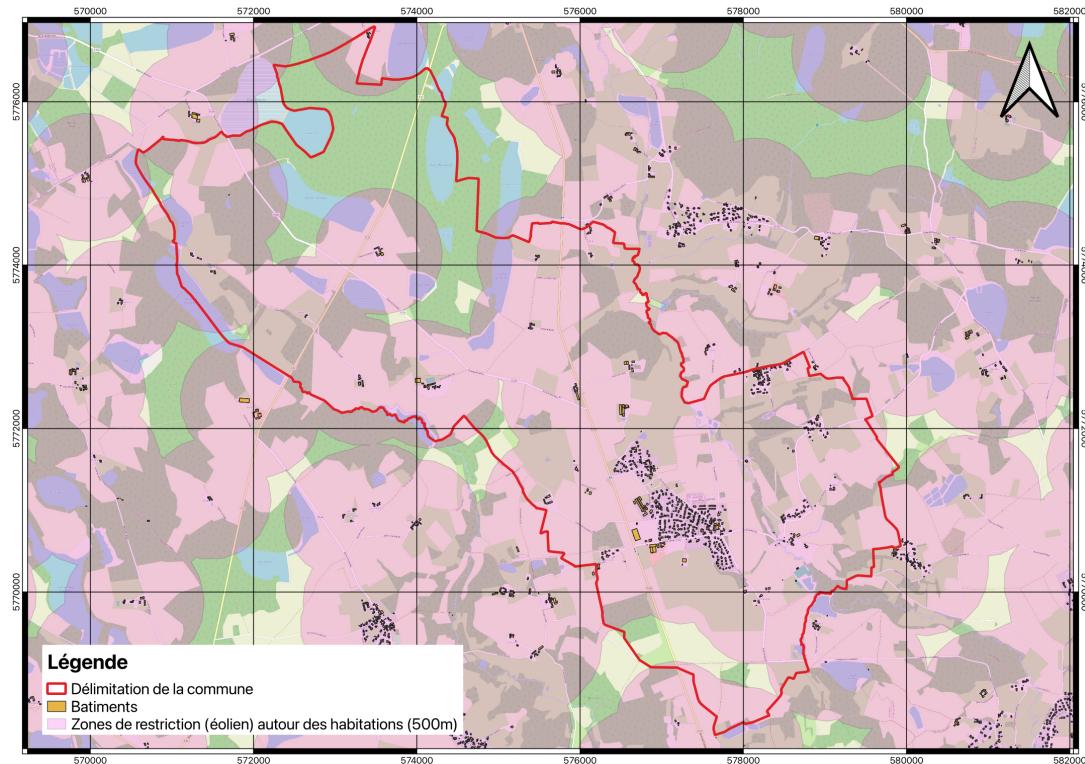


FIGURE 16 – Zones restreintes pour l’implantation d’éoliennes

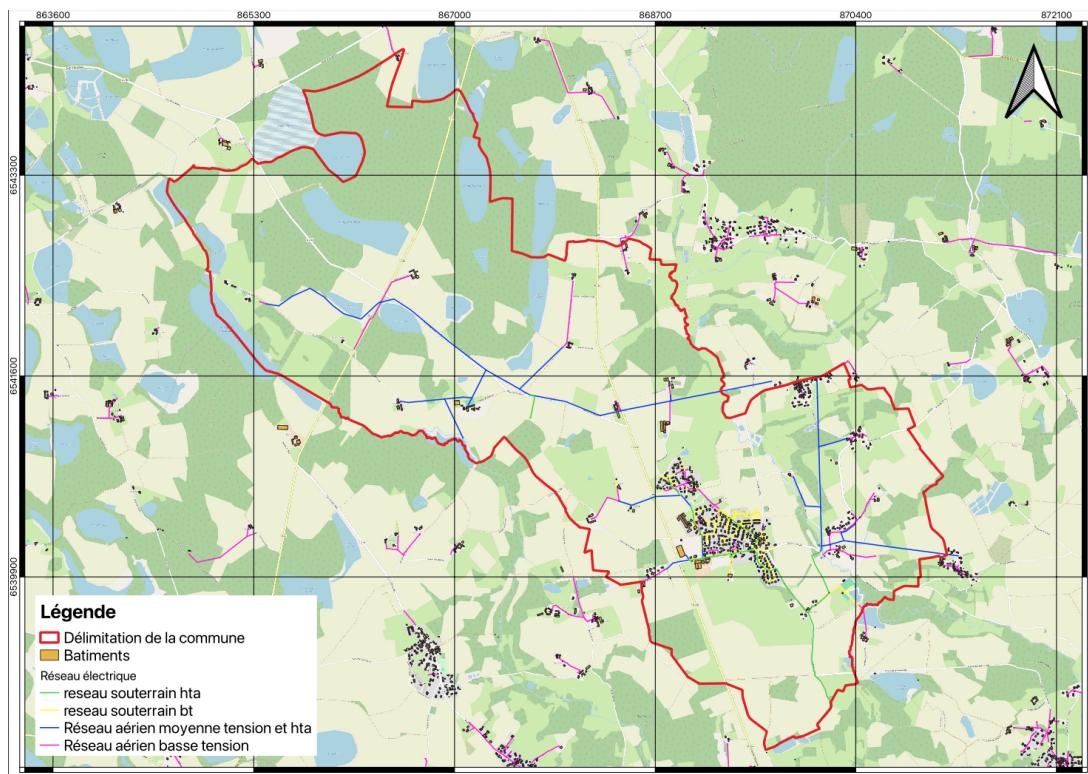


FIGURE 17 – Réseau électrique sur la commune de Rignieux-le-Franc

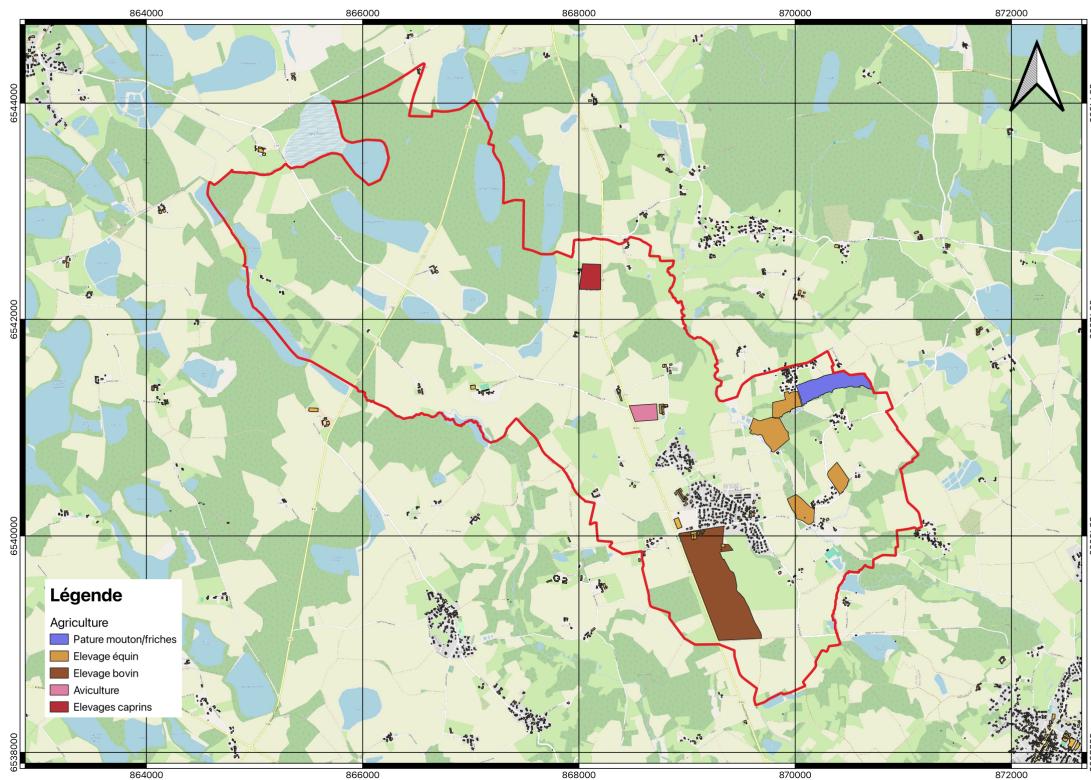


FIGURE 18 – Différents élevages sur la commune de Rignieux-le-Franc

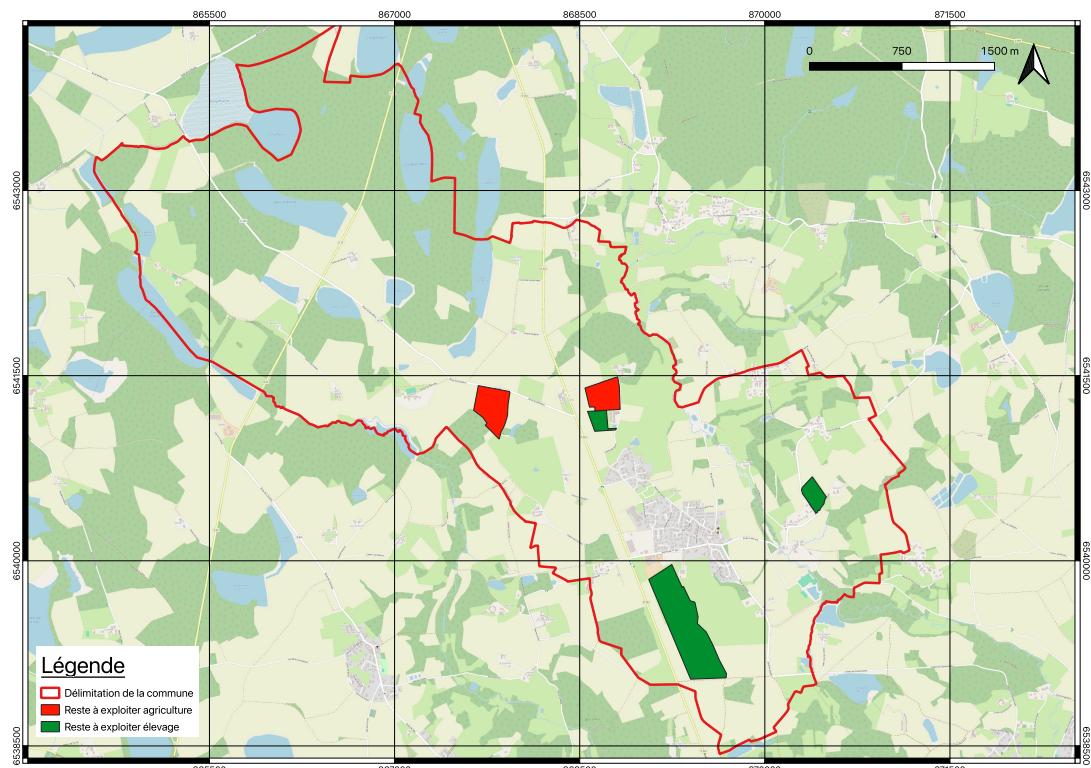


FIGURE 19 – Parcelles retenues pour l'étude d'agrivoltaïsme

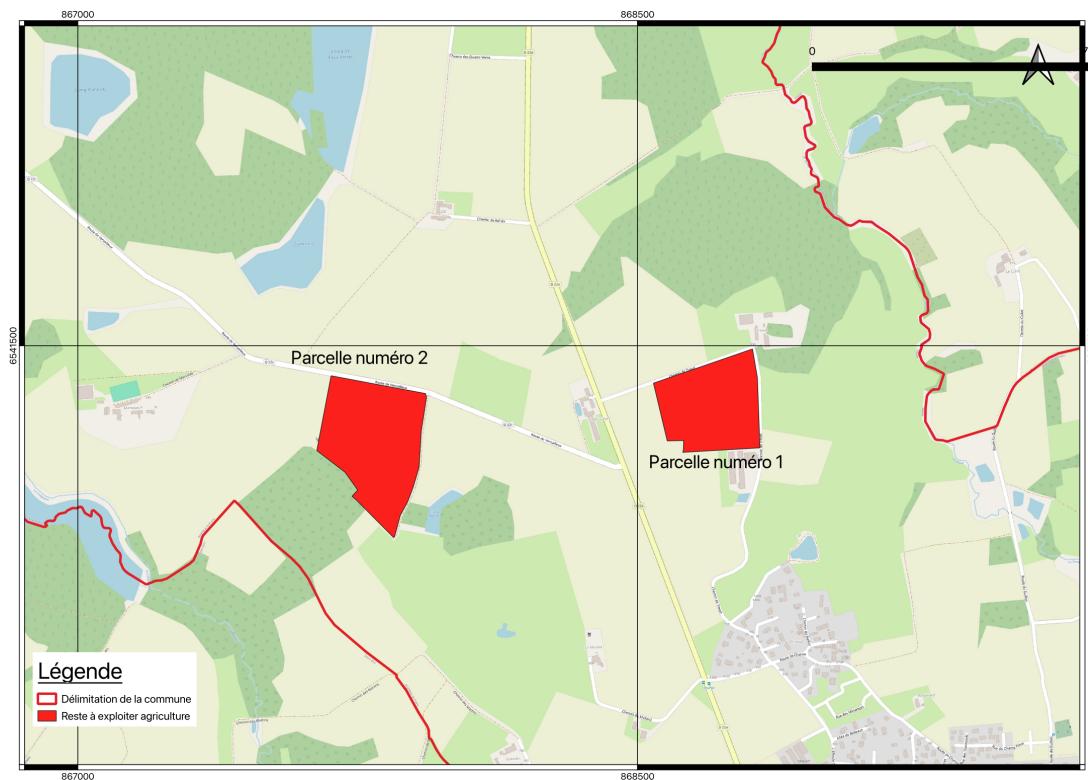


FIGURE 20 – Parcelles retenues pour l'agrivoltaïsme en culture

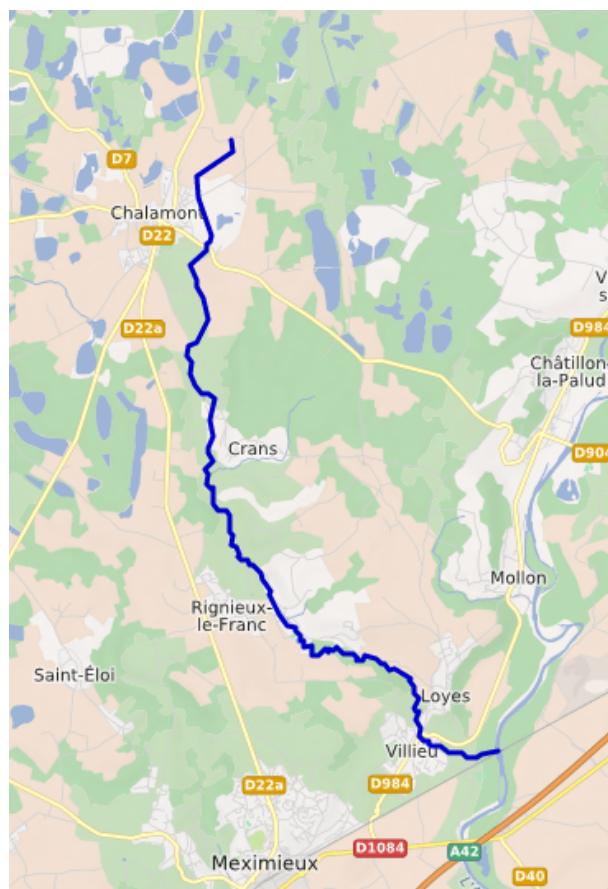


FIGURE 21 – Parcours du Toison (d'après la carte interactive du bassin de l'Ain)

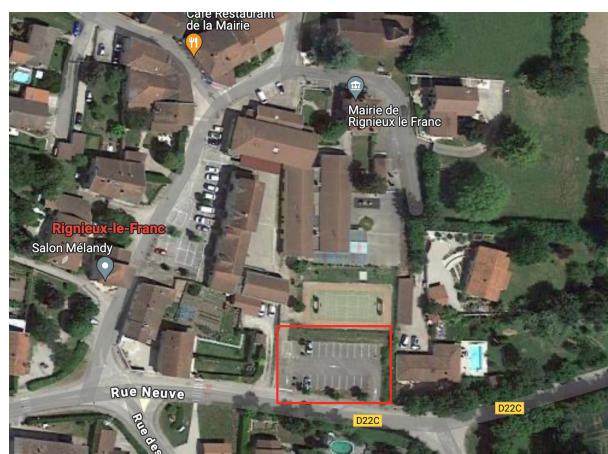


FIGURE 22 – Localisation du parking communal



FIGURE 23 – Photo satellite de Rignieux-le-Franc (source : Google Maps)

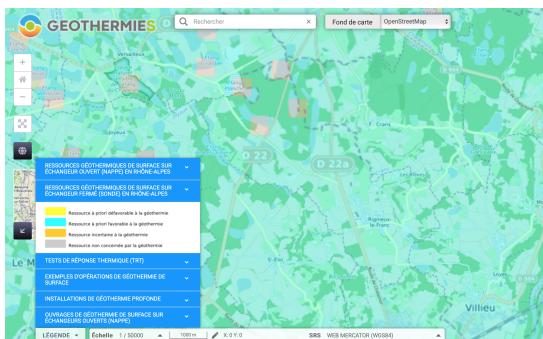


FIGURE 24 – Potentiel géothermique en circuit fermé de la commune de Rignieux-le-Franc, Source : [www.geothermies.fr](http://www.geothermies.fr)

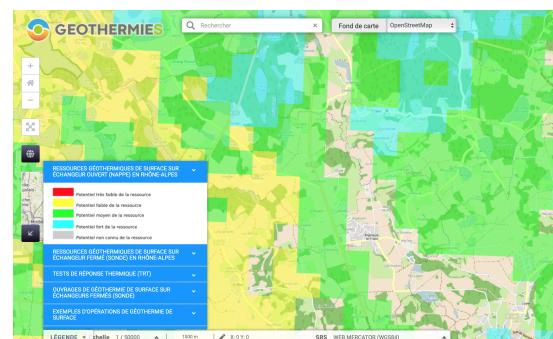


FIGURE 25 – Potentiel géothermique en circuit ouvert de la commune de Rignieux-le-Franc, Source : [www.geothermies.fr](http://www.geothermies.fr)

### 7.1.3 Point sur les zones agricoles strictes (AS) [P]

Les zones agricoles sont définies dans le plan local d’urbanisme (PLU) comme suit :

« La destination principale de la zone A est la mise en valeur et la protection des ressources de l’espace naturel. Elle regroupe les secteurs de la commune équipés ou non, à protéger en raison de potentiel agronomique, biologique ou économique des terres agricoles. »

Les zones agricoles permettent certains travaux sur des bâtiments existants et même certains nouveaux aménagements.

Ces zones agricoles comprennent des zones agricoles strictes (AS). Ces zones interdisent toutes constructions. Malgré cela, l’état a annoncé **officiellement** (aucun décret n’a pour l’instant été publié) que des assouplissements pourraient être envisagés sur les zones agricoles strictes dans le cadre d’installation de moyen de production d’énergie renouvelable.

## 7.2 Le simulateur AutoCalSol [J]

Concernant la modélisation de la consommation d’un foyer, le logiciel AutoCalSol propose l’utilisation d’un scénario de référence mis à disposition par Enedis. Ce scénario, basé sur des

données de consommation réelles, permet d'approcher la répartition de la consommation électrique d'un foyer (compte tenu de sa consommation totale annuelle) en fonction des heures de la journée, ainsi que de la période de l'année.

Le simulateur AutoCalSol prend (dans sa version gratuite) en entrée les paramètres suivants : Position géographique de l'installation, inclinaison par rapport au sol, azimut (orientation par rapport au sud), puissance crête installée, type d'abonnement électrique, tarif et consommation totale électrique, montant des CAPEX et OPEX, primes éventuelles, tarifs de rachat, durée de vie de l'installation et inflation du kWh électrique soutiré. La version payante permet quant à elle de choisir la technologie de cellule solaire (par défaut, silicium cristallin), l'indice de performance (réglé à 87 % par défaut), le scénario de consommation (par défaut, celui d'Enedis pour un foyer), le pays d'origine et la zone d'installation des panneaux pour le calcul de temps de retour énergétique.

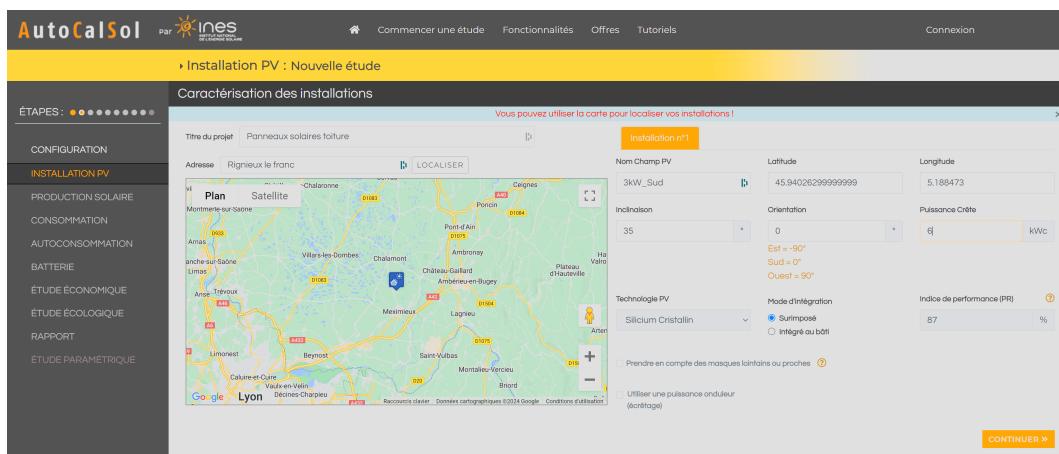


FIGURE 26 – Écran d'accueil du site AutoCalSol

### 7.3 Distribution de Weibull

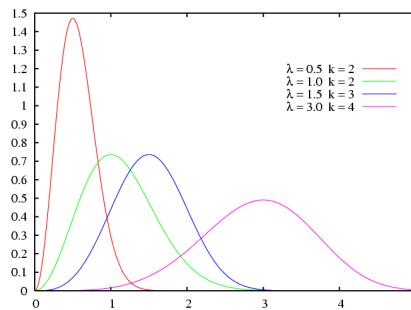


FIGURE 27 – Profils d'une distribution de Weibull (d'après Wikipédia)

### 7.4 Contraintes détaillées

#### 7.4.1 Méthanisation [C]

En fonction de la quantité de gaz inflammable susceptible d'être présente dans les installations (supérieur ou égal à 10 tonnes), celles-ci peuvent relever d'un classement 4310 (Substances inflammables - SEVESO). Lorsque que la quantité totale susceptible d'être présente dans les installations, y compris dans les cavités souterraines (strates naturelles, aquifères, cavités salines

et mines désaffectées) est comprise entre une tonne (inclus) et 10 tonnes (exclus), une déclaration est nécessaire. Au-delà de 10 tonnes (inclus), il faut une autorisation.

Les installations biogaz peuvent par ailleurs devoir respecter d'autres considérations environnementales, par exemple sur le périmètre de protection des captages publics, sur la législation sur l'eau, et sur la réglementation sanitaire.

Le décret n° 2022-1120 du 4 août 2022 relatif aux cultures utilisées pour la production de biogaz et de biocarburant précise que les installations de méthanisation peuvent être approvisionnées par des cultures principales dans une proportion maximale de 15 % du tonnage brut total des intrants. Pour les installations de production de biométhane injecté dans un réseau de gaz naturel, mises en service après le premier janvier 2017, la proportion maximale de cultures principales est applicable pour chaque lot de biométhane (quantité de biométhane injecté sur une période donnée) mentionné à l'article R. 446-1 du Code de l'énergie.

Des dispositifs de soutien pour la méthanisation sont disponibles. Depuis 2007, l'ADEME soutient financièrement les investissements de méthanisation de déchets et effluents industriels, agricoles et municipaux, hors installations de valorisation du biogaz issues d'installations de stockage de déchets non dangereux avec :

- le fond "déchets / économie circulaire" finance les équipements de traitement du digestat et les projets de méthanisation avec valorisation du biogaz produit par cogénération
- le fond "chaleur" finance les projets de méthanisation avec valorisation directe de chaleur (et les réseaux de chaleur associés) ainsi que les projets d'injection de biométhane dans les réseaux de gaz

La production d'électricité dans des installations qui valorisent le biogaz est soutenue dans les conditions fixées par l'arrêté du 13 décembre 2016 et l'arrêté du 9 mai 2017. Les méthaniseurs de plus de 500kW sont soutenus par appels d'offres tandis que les méthaniseurs de moins de 500kW sont soutenus par un tarif d'achat de l'électricité garanti pendant 20 ans. Les différents types de modèles de contrats sont disponibles sur le site d'EDF OA. [56].

#### 7.4.2 Agrivoltaïsme [P]

Rignieux-le-Franc accueillant des exploitations dédiées à la culture céréalière ainsi que des exploitations dédiées à l'élevage d'animaux, nous étudierons les contraintes techniques liées à l'agrivoltaïsme pour ces deux cas d'études précis.

**Agrivoltaïsme et culture céréalière :** Selon l'ADEME, la pertinence (ou non) d'un projet agrivoltaïque repose sur :

- l'incidence sur la production agricole
- l'incidence sur les revenus de l'exploitation

Tout d'abord, pour évaluer l'incidence sur la production agricole, il est nécessaire de prendre en compte les modifications sur les rendements des cultures. En effet, la présence de panneaux solaires peut selon la technologie utilisée :

- réduire l'ensoleillement
- augmenter l'humidité au sol
- diminuer la température au sol
- augmenter la hauteur de pousse des cultures,
- compromettre le passage des engins utilisés pour l'exploitation

Concentrons nous dans un premier temps sur les détails liées aux **abris climatiques** (voir l'image 28).



FIGURE 28 – L'agrivoltaïsme et l'utilisation de la technologie d'abris climatiques

Le principal avantage d'un tel type d'installation du point de vu des cultures est la protection des céréales en cas d'exposition à des chaleurs très importantes et prolongées (des diminutions des températures au sol sont notables d'après). En revanche, la diminution de l'exposition au soleil causée par une installation de ce type occasionnera nécessairement des pertes de rendements sur les récoltes sur le long terme. En effet, une étude réalisée en Allemagne (voir l'étude [57]) a montré une baisse de 8% pour le blé d'hivers en 2019. De plus, l'étude italo-néerlandaise [58] a elle aussi montré une baisse de rendement pour le maïs dans des conditions normales (bien qu'une hausse de rendement soit notée dans des cas de sécheresse extrême). De manière générale, aucun consensus n'existe sur une valeur précise de la perte de rendement. Cependant, dans des conditions météorologiques tempérées (similaires à celles présentes dans notre zone d'étude), un ordre de grandeur de perte sur les récoltes en céréales variant **entre 5% et 10%** semble être retenu pour des abris climatiques fixes.

En plus de cette perte d'exposition solaire, une perte d'espace au sol est à prendre en considération. L'étude allemande [57] a relevé en 2017 une perte de 8,3% de la surface au sol. C'est l'unique étude qui parle d'une perte de superficie sur l'exploitable, il est donc compliqué d'avoir du recul sur ce chiffre.

Enfin, la société TSE Energy préconise un maximum de surface couverte par les panneaux solaires correspondant à 45% de la superficie totale de la parcelle.

La deuxième technologie d'agrivoltaïsme dont nous nous proposons d'étudier les contraintes est la technologie de **tracker** (voir l'image 29).

Ces trackers partagent certaines contraintes avec les abris climatiques, notamment celle de la perte de superficie exploitable. Prenons par exemple la technologie de tracker proposée par OKwind (quelques détails sur leur [51]). Chaque tracker repose sur un pilier de fondation occupant une superficie au sol de  $6,25m^2$  environ. La somme des superficies unitaires de chacun des modules entraînera des pertes et nécessitera un ré-agencement des espaces de travail. Un maximum de 8 à 10 trackers par hectare sera recommandé afin de ne pas interférer de manière trop importante avec la culture.



FIGURE 29 – Technologie de tracker solaire

En plus de cette perte d'espace au sol, les trackers (contrairement aux abris climatiques, pouvant être positionnés suffisamment haut pour permettre aux engins de circuler) ne disposent pas de hauteurs fixes et suffisantes pour laisser passer les engins agricoles. Reprenons la technologie proposée par le français OKWind, lorsque le tracker est orienté à 50° par rapport à l'horizontal, une hauteur de seulement 3m est laissée sous le module (voir le schéma 30, issus du site du même industriel), ce qui peut s'avérer insuffisant avec de nombreux types d'engins agricoles. Il sera donc nécessaire d'orienter les trackers en position horizontale lors du passage d'engins.

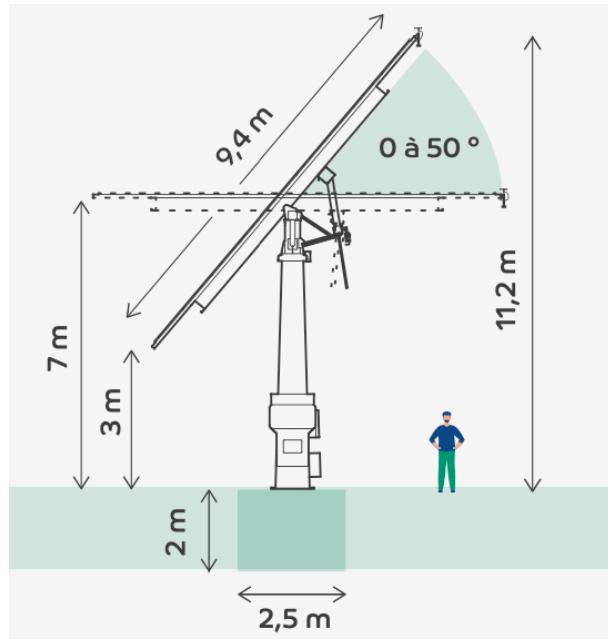


FIGURE 30 – Schéma de la technologie proposée par OKWind

**Agrivoltaïsme et élevage :** Pour rappel, Rignieux-le-franc accueille des élevages bovins, caprins, équin, ovin ainsi que de l'aviculture (voir la figure 18).

Les contraintes liées à l'implantation d'agrivoltaïsme sur des espaces dédiés à l'élevage sont principalement de deux types :

- Le bien-être animal
- La protection des infrastructures

Si la mise en place de rangs de panneaux solaires constitue un abri de chaleur pour les animaux lorsque les conditions thermiques deviennent difficile (voir l'image 31), ils ne doivent pas être dimensionnés à la légère. Afin d'être compatibles avec l'élevage, les structures ne doivent pas occasionner de ségrégation (afin d'éviter d'isoler certains spécimens, notamment les plus jeunes). Pour cela, des hauteurs permettant le passage de tous les individus doivent être privilégiées. Ces hauteurs permettront aussi d'éviter les blessures des animaux suite à des collisions avec les modules.



FIGURE 31 – L'agrivoltaïsme avec l'élevage de mouton

La présence de câbles électriques entraîne deux autres risques :

- celui d'électrocution
- celui de pendaison (le retour d'expérience de certains agriculteurs appui celui-ci)

Les câbles doivent donc être isolés et hors d'atteintes quel que soit l'élevage concerné.

Le tableau 7 suivant récapitule quelques recommandations d'implantations (issues de retour d'expérience synthétisés sur le document [48] et issues de l'étude [59]). Aucune législation/recommandation n'étant en vigueur pour les élevages bovins, nous suivrons les recommandations les mêmes recommandations que pour les élevages ovins.

Elevage	Recommandations
Aviculture	Hauteur supérieure ou égale à 1.80m Écartement de 30m minimum entre le poulailler et les modules La surface cumulée de panneaux solaires ne devra pas dépasser 15% de la surface de minimale réglementaire de l'exploitation Un espacement d'au moins une largeur entre chaque module
Pâturages (bovin/ovin/équestre)	La surface couverte par les panneaux doit être inférieure ou égale à 30% de la superficie de l'exploitation Hauteur supérieure à 1.80m pour les bovins, à 1.10 pour les ovins, à 2.20 pour les chevaux

TABLE 7 – Recommandations pour les élevages

Un point d'intérêt est l'impact d'une telle installation sur le fourrage dont disposent les bêtes. En effet, si l'ombre que créera l'installation permettra en été une pousse plus importante des fourrages (voir l'étude [59]), elle occasionnera à la mi-saison et en hivers des zones moins herbues. Il semblerait toutefois que le potentiel de fourrage annuel ne soit pas négativement

impacté.

Les comportements des animaux n'étant pas parfaitement prévisibles, les structures devront être capable de résister à d'éventuelles collisions/percussions. Enfin, les sites devront aussi prévoir des accès pour les maintenances des systèmes.

#### 7.4.3 Solaire thermique [P]

Selon la localisation, la superficie de panneaux à installer ne sera pas la même. D'après l'ADEME (voir le document [19]), un chauffe-eau solaire individuel équipé de  $4\ m^2$  de capteurs serait nécessaire pour fournir en eau chaude une famille de 4 personnes vivant dans le nord de la France. Pour une famille de 4 personnes vivant dans le sud de la France, un chauffe-eau solaire individuel équipé de  $2\ m^2$  de capteurs serait suffisant.

Le ballon d'eau doit être positionné de manière privilégiée le plus proche possible du système de capteurs solaire. Le placer dans une pièce chauffée, ou à minima isolé, apporte un réel avantage. De plus, les tuyauteries passant par des locaux non chauffés devront être isolées thermiquement afin de limiter les pertes thermiques.

Afin de prévenir d'éventuels problèmes de surchauffe, l'installation d'une boucle de décharge peut être intéressante. La tuyauterie de la boucle de décharge pourra passer en sous-sol, ou être valorisée en chauffant une piscine par exemple.

L'orientation et l'inclinaison des capteurs récepteurs doivent être optimisée afin de capter le maximum de rayonnement solaire et de maximiser la production en hivers et afin d'éviter les surchauffe en été. L'ADEME préconise une inclinaison idéale de  $30^\circ$  à  $45^\circ$ , avec idéalement une orientation vers le sud (voir le document [19]).

Enfin, de même que pour l'installation de panneaux photo-voltaïque en toiture, la bonne tenue structurelle de la charpente doit être assurée. Une surcharge du même ordre de grandeur que celle apportée par les panneaux photovoltaïques peut être retenue. Par exemple, l'installateur France Chauffage Solaire, installe des capteurs solaires de  $2\ m^2$  pesant 32 kg (voir [60]).

#### 7.4.4 Géothermie [P]

Tout d'abord, il est nécessaire de connaître le potentiel de la ressource, celui-ci va déterminer la viabilité ou non d'un projet de géothermie. Lors de l'étude du potentiel géothermique, on peut s'intéresser à deux types de ressources :

- la ressource géothermique de surface sur échangeur ouvert (nappe)
- la ressource géothermique de surface sur échangeur fermé (sonde)

Ces disponibilités en ressources sont détaillées sur des cartes de potentiel géothermique.

La technologie utilisant la première ressource puise directement dans l'eau tiède des nappes et exploite sa chaleur à travers l'utilisation d'une pompe à chaleur. Avec cette technologie, la ressource en eau tiède doit être située au droit de la zone d'utilisation puisque le forage est réalisé verticalement. Dans un projet géothermique de surface avec échangeur ouvert, il faudra s'assurer que l'intégralité de l'eau puisée dans la nappe lui soit retournée en qualité et en quantité identique. Cette première technologie s'adaptera plus particulièrement aux collectivités et aux industries.

La technologie réalisée par boucle fermée permet de chauffer une eau en circuit fermé grâce à la chaleur des sols, elle n'utilise donc pas l'eau des nappes. Cette technologie ne nécessite

pas la présence de ressource au droit de l'exploitation. Elle est adaptable à l'utilisation par des particuliers.

La seconde contrainte est de l'ordre spatial. En effet, les forages en nappes superficielles nécessitent une place de  $150\ m^2$  (voir la source [20]). De plus, des distances allant de  $100m$  à  $200m$  devront séparer les différents forages (voir le document [20]).

## 7.5 La maintenance des solutions retenues [P]

### 7.5.1 Maintenance des panneaux photo-voltaïques

Afin de prévenir des pertes significatives en performance, les cellules solaires devront être maintenues propres. Pour cela, un contrôle visuel régulier devra être effectué. Les solutions d'agri-voltaïsme devront faire l'objet de contrôles visuels plus fréquent, en effet, le passage des engins et le piétinement des animaux engendrera un encrassement rapide.

Le rythme des maintenances variera selon l'usage. Pour le photo-voltaïque de toiture, les maintenances pourront être réalisée de manière décennale. En revanche, pour les installations de plus grosses puissances, des maintenances annuelles seraient préférables (voir [61]).

### 7.5.2 Maintenance d'un système solaire thermique

Tout comme pour les technologies solaires photo-voltaïques, les cellules solaire thermique doivent être maintenues propres. En plus de cela, un contrôle devra être effectué régulièrement afin d'assurer l'absence de fuites du fluide solaire. Un suivi des systèmes de tuyauterie et électroniques permettra d'assurer le bon fonctionnement du système dans le temps.

### 7.5.3 Maintenance de la station de méthanisation

En plus d'un suivi visuel et d'un suivi de performances à l'aide de capteurs, un entretien des digesteurs doit être réalisé. Lors de cet entretien, une équipe spécialisée effectue un curage de la cuve (préalablement vidé de son contenu) et vérifiera son bon état. Un suivi des tuyauterie doit être assuré.

## 7.6 Point sur la modélisation financière [T]

Le Free Cash Flow Opérationnel (FCFO) et la Valeur Actualisée Nette (VAN) sont deux outils utilisés pour connaître la viabilité financière d'un projet. Le FCFO compte le flux entrant ou sortant d'argent dans le projet.

En le corrigéant avec un taux d'actualisation, qui représente la valeur actuelle des flux monétaires futurs, puis en sommant tous les FCFO prévisionnels depuis le début du projet, on obtient la VAN pour l'année  $n$ . Un projet est viable financièrement (avec les hypothèses choisies) si sa VAN devient supérieure à zéro durant la durée de vie du projet.

Tel qu'il est représenté dans nos études, le projet comprend une phase où le FCFO est négatif (le développement et la construction) puis une phase où le FCFO est positif (l'exploitation, lorsque les OPEX sont plus faibles que les entrées). Cela se traduit par une VAN d'abord en chute, puis une augmentation de forme logarithmique jusqu'à la fin du projet. Cette forme logarithmique s'explique par le taux d'actualisation qui diminue progressivement la valeur des flux futurs.

## 7.7 Gestion de projet [P]

L'équipe du projet est constituée de quatre élèves de troisième année l'école Centrale de Lyon, elle est accompagnée par un commanditaire représentant la commune de Rignieux-le-Franc, Monsieur Pierre BOILEAU. L'encadrement du projet a été réalisé par monsieur Eric VAGNON, professeur à l'école centrale de Lyon, qui a encadré et conseillé l'équipe durant le projet.

Afin d'organiser au mieux le projet et de rendre le suivi des tâches plus facile, l'équipe de travail a été organisée comme suit :

Membre	Rôle	Pôle
Paul BERTHAUD	Chef de projet, responsable de tâche étude des solutions	Acquisition des données, études des solutions, résultats
Tristan CHEVREAU	Responsable de tâche simulation	Acquisition des données, simulation, résultats
Jules MANSION	Responsable de tâche acquisition de données	Acquisition des données, études des solutions, résultats
Clémence MARTIN	Responsable synthèse et rapport	Acquisition des données, études des solutions, résultats

L'équipe de travail s'est réunie au moins une fois par semaine dans le but de faire un état des lieux de l'avancement des tâches et d'éclaircir les problématiques. Lors de ces réunions, chaque membre détaillait l'état des tâches dont il était responsable afin d'assurer leur finalisation dans les temps.

La planification du projet a été réalisée à l'aide d'un tableur Google (voir la figure 32 ci-dessous). Ce diagramme a été passé en revue et modifié tout au long du projet lors des réunions de projet.

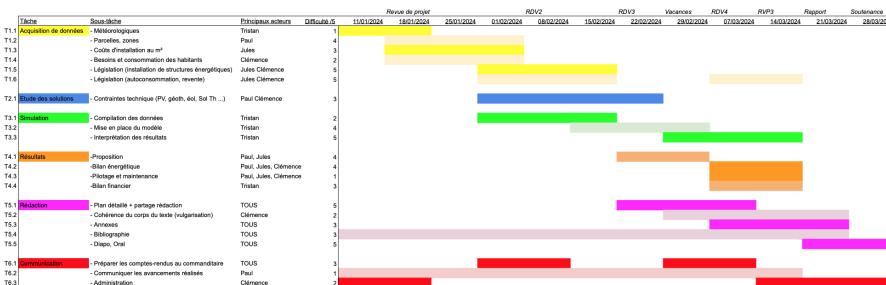


FIGURE 32 – Planification du projet

Le diagramme de PERT ci-dessous (voir la figure 33) met en lien chacune des tâches à effectuer et fait apparaître les liens de dépendances qui unissent certaines d'entre elles. De cette manière, nous avons pu clairement identifier les tâches critiques, devant être achevées avant de commencer les suivantes.

Le volume horaire initialement affilié au projet était de 200 heures au total (50 heures par membre du groupe). Le tableau 8 synthétise le temps effectivement ouvré par chaque membre du groupe. Ce temps global inclue les réunions de groupe, avec le commanditaire ou sans ce dernier, ainsi que les points d'avancement avec le professeur encadrant le projet

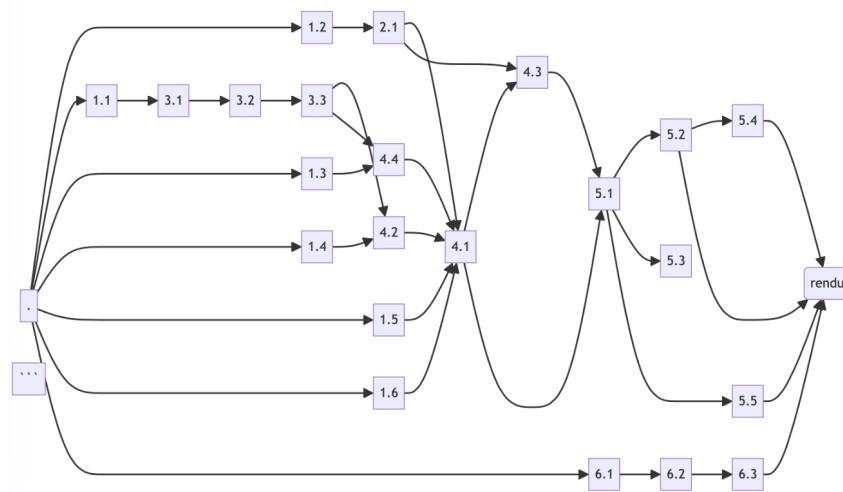


FIGURE 33 – Diagramme en flux des tâches du projet

Membre	Temps travaillé (h)
BERTHAUD Paul	65
CHEVREAU Tristan	65
MANSION Jules	50
MARTIN Clémence	60
<b>TOTAL</b>	<b>240</b>

TABLE 8 – Tableau récapitulatif des temps passés sur le projet par membre du groupe