



Métiers de l'Ingénieur Généraliste : MIG Solaire 2020

Projet encadré par Philippe Blanc, Joris Masafont et Romain Besseau

Et réalisé par Amandine Chupin, Claire Meunier, Ibtissem Quaïsse, Léo Quignon, Maxence Morillon, Maxime Studter, Morgane Picot, Pauline Vehrlé, Ralf Cortês Do Nascimento, Rémi Carencotte, Sacha Bressollette, Tasnim Kazi Tani, Théo Communal et Thibaut Arrat

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier nos encadrants Philippe Blanc, Joris Masafont et Romain Besseau d'avoir réorganisé notre MIG afin que nous puissions travailler à Sophia Antipolis malgré le contexte très particulier et difficile, et de nous avoir guidés dans le développement de notre projet.

Nous remercions également les élus des communes de Valderoure, Séranon et La Martre de nous avoir accueillis et permis de travailler et échanger sur les enjeux de leur commune.

Nous saluons les étudiants de l'Ecole Nationale Supérieure du paysage de Versailles et les remercions d'avoir participé activement à cette confrontation des visions quant à la gestion d'un territoire.

Nous voulons aussi remercier les différents acteurs qui nous ont aidés dans les recherches pour nos projets :

- Christian Dupraz, qui nous a donné des informations cruciales sur l'agri-voltaïsme.
- Denis Blanquet, qui nous a apporté une aide précieuse dans les sous-projets de STEP et d'agrivoltaïsme.
- Hubert Remillieux, qui a travaillé sur un projet d'autoconsommation collective similaire et nous a fourni son expérience.
- Jean Pierre Clarac, qui nous a transmis ses connaissances sur la gestion de la forêt et d'un territoire en général
- Les agriculteurs du PNR qui ont pris le temps de répondre à nos questions.

Table des matières

Partie I : Sommaire de gestion	4
1/ A court terme : la maison de territoire ou la vitrine d'un territoire ancré dans la transition écologique	4
1.1/ Le concept	4
1.2/ Localisation	4
1.3/ Le projet	5
2/ A court et moyen terme : l'expérience au profit du développement, le solaire comme tremplin énergétique	5
2.1/ L'agrivoltaïsme ou réalisation de projets photovoltaïques en milieu agricole	5
2.2/ Gestion du territoire forestier	6
2.3/ Développement du photovoltaïsme	7
2.4/ Les microSTEP (Station de Transfert d'Energie par Pompage)	8
3/ A long terme : la valorisation de la dynamique retrouvée du territoire	8
3.1/ Mise en place d'un méthaniseur	8
3.2/ Mobilité et déplacements sur le territoire	9
Partie II : Les projets	10
1/ Maison de territoire	10
1.1/ Déroulement de l'étude	10
1.2/ Mise en forme du projet	11
2/ Des projets expérimentaux	15
2.1/ L'agrivoltaïsme	15
2.2/ La gestion de la forêt	20
2.3/ Le développement du photovoltaïsme	22
2.4/ Les microSTEP pour stocker l'énergie	28
3/ Valorisation de la dynamique du territoire	33
3.1/ Autre mode production d'énergie renouvelable : la méthanisation	33
Bilan	35
Bibliographie	36

Partie I : Sommaire de gestion

Au cours de cette édition 2020 du MIG Solaire, nous avons travaillé sur la redynamisation économique et la transition énergétique et écologique d'un territoire rural du Haut-Pays de la Côte d'Azur. Ces enjeux sont très actuels dans un contexte de changement climatique qui implique des modifications du mix énergétique dans les années à venir. De plus, les communes étudiées de Séranon, Valderoure et La Martre s'inscrivent dans un territoire fortement ensoleillé marqué par l'installation d'un poste source par ENEDIS permettant le développement à grande échelle des énergies d'origine solaire. L'enjeu est maintenant de proposer des idées scientifiquement pertinentes et dont la démarche paysagère est cohérente avec les spécificités du territoire et les attentes des habitants.

Dès la première réunion avec les représentants élus des communes de Séranon, de Valderoure et de La Martre, il est apparu que malgré les frontières administratives, le cadre d'étude était en réalité un seul et même territoire partagé entre 3 départements (Alpes de Haute Provence 04, Alpes Maritimes 06 et Var 83) et deux Parc Naturels Régionaux (PNR, du Verdon et des Préalpes d'Azur). Ainsi, l'idée d'initier un projet de territoire commun s'affranchissant des frontières entre les différents acteurs est née. Ce projet de territoire doit en premier lieu être une source de revenus pour celui-ci et vise à renforcer le dynamisme des parcs.

Nous avons donc mis en place une stratégie globale à différentes échelles, à la fois dans le temps et dans l'espace grâce à une sensibilité paysagère apportée par les élèves de l'École Nationale Supérieure de Paysage de Versailles-Marseille. Les différents intervenants et nos encadrants nous ont permis de "croiser les regards" pour aborder cette situation complexe sous différents angles.

1/ A court terme : la maison de territoire ou la vitrine d'un territoire ancré dans la transition écologique

1.1/ Le concept

Notre stratégie consiste à raisonner sur des échelles spatiales imbriquées et interconnectées. Nous proposons que, dans un premier temps, les investissements soient concentrés sur le hameau du Logis du Pin qui agirait comme site expérimental à l'échelle territoriale, constituant ainsi le levier permettant la réalisation des projets ultérieurs. En effet, le Logis du Pin possède une localisation stratégique au sein du territoire car il est à la confluence des 3 départements et des 2 parcs et est traversé par la route Napoléon. Nous avons conclu que, pour des raisons de faisabilité (financements, emprise limitée au sol...), l'implantation d'un bâtiment commun aux différents acteurs était justifiée, la maison de territoire étant le point de départ approprié.

1.2/ Localisation

La localisation idéale à nos yeux pour cette réalisation est présentée figure 4 : cette parcelle municipale constructible de 1000 m² préservant les terres agricoles s'inscrit dans une butte rocheuse naturelle d'une dizaine de mètres de hauteur offrant un promontoire sur toute la vallée. L'installation s'inscrit dans une logique cohérente, en lien avec son environnement proche que constituent l'office de tourisme et le gîte qui cherche déjà à être passif énergétiquement, le bistrot de pays La Merenda, un primeur local, une future zone commerciale, un Spar ainsi qu'une station-service localisés dans un rayon inférieur à 2 km.

Nous avons donc retenu cette localisation, avec les encouragements de Mme Raymonde Carletti, maire de la Martre ; M. Michel Charabot, premier adjoint au maire de Séranon et M. Jean-Paul Henry, maire de Valderoure.

1.3/ Le projet

Il convient alors de définir les caractéristiques exactes du projet : l'idée d'un espace de vente de produits locaux avait déjà été mise sur la table par le passé, mais jamais réalisée. En effet, de telles initiatives existent déjà, comme Esprit de Provence qui vend des produits locaux ; ou sont en cours de réalisation (Maison de Pays à Castellane).

Il est donc nécessaire de réinventer le format du projet. Voici les différentes pistes que nous avons identifiées grâce aux idées des acteurs locaux :

- Faire de ce lieu une vitrine du territoire :
- Ce lieu permettra de présenter aux visiteurs le patrimoine (touristique, culturel, agricole, naturel) du Haut-Pays du territoire sur lequel il est situé.
- Son architecture pourra se baser sur les principes suivants :
 - S'appuyer sur les différentes lignes du territoire, définies par les bâtiments existants, la butte dans laquelle nous souhaitons inscrire le bâti et la végétation présente. L'insertion paysagère est primordiale ici.
 - Proposer une architecture "solaire", respectant les principes d'une maison passive (i.e. neutre en dépense énergétique) : orientation des vitrages vers le sud, possibilités d'ombrages pour l'été, exposition favorable pour mettre des panneaux sur le toit.
 - Garder l'esprit des bâtiments historiques et respecter le contrat de ruralité
 - La transition énergétique, c'est aussi la sobriété énergétique. Un bâtiment passif doit être correctement isolé et sa conception doit utiliser intelligemment les ressources disponibles.
- Faire de cet endroit un lieu de rencontre, utile aux habitants :
- La commune de la Martre comptait déjà installer dans son office du Tourisme une antenne de services administrative. Elle offrirait aux habitants locaux des services publics à proximité de leur lieu de vie, ce qui permettrait en même temps de limiter les aller-retours jusqu'à la côte.
- Un espace de coworking est une mesure chère aux représentants élus de Valderoure, offrant la possibilité aux différents acteurs locaux de se rencontrer, de travailler ensemble. Cet espace sera un levier important pour l'installation de la fibre dans la région, car le mauvais débit internet est un facteur limitant de l'installation de l'économie tertiaire.
- Une grande salle de réunion pourra accueillir les diverses réunions liées aux parcs, communautés de communes, agglomérations, ...
- Les services du PNR des Préalpes d'Azur, actuellement installés à Saint-Vallier de Thiey dans une ancienne gendarmerie, pourraient être intéressés par des locaux neufs à l'entrée du parc.

2/ A court et moyen terme : l'expérience au profit du développement, le solaire comme tremplin énergétique

2.1/ L'agrivoltaïsme ou la réalisation de projets photovoltaïques en milieu agricole

Les communes de Valderoure, de Séranon et de La Martre sont implantées dans un milieu rural, où l'agriculture est une activité majeure et l'ensoleillement est conséquent. Dans un contexte de croissance démographique, l'agriculture et la production d'énergie (électrique notamment) risquent de rentrer spatialement en concurrence. L'agrivoltaïsme, une technique qui consiste à placer des panneaux photovoltaïques au-dessus de productions agricoles, est une solution envisagée. C'est une technique encore expérimentale mais qui semble prometteuse quant à la réponse aux problématiques expliquées précédemment. Elle permet de répondre aux problèmes spatiaux évoqués, mais également de remettre la production énergétique à la vue du consommateur pour

entamer un changement de regard et de comportement sur les transitions en cours (voir figure 12). En effet, en discutant de ce projet avec les différents acteurs des communes, nous nous sommes rendus compte que la réaction naturelle était de tenter de “cacher” les panneaux solaires afin qu’ils ne soient pas visibles de la route. Or, remettre la production à la vue du consommateur c’est aussi impulser une consommation plus raisonnable.

Le but du projet d’agrivoltaïsme est de créer une symbiose entre ces deux derniers points en plaçant des panneaux photovoltaïques au-dessus de cultures nécessitant des périodes d’ombre dans la journée afin de se développer.

Nous souhaiterions réaliser ce projet à titre expérimental dans les parcelles agricoles autour de la maison du territoire dans un premier temps afin de vérifier que la production d’énergie n’empiète pas sur la production agricole. Pour cela nous avons sélectionné trois plantes à parfums : la mélisse, la violette et l’angélique cultivées selon trois configurations différentes qui permettront de déterminer quelle est l’installation qui empiète le moins sur la production agricole.

Si cette étude permet de vérifier les avantages de l’agrivoltaïsme dans le développement de certaines cultures tout en permettant une production énergétique, la configuration sélectionnée pourra être reproduite à grande échelle.

2.2/ Gestion du territoire forestier

2.2.1/ Contexte

Malgré nos a priori concernant la question de l’évolution des forêts méditerranéennes, qui nous poussent plus ou moins consciemment à envisager de ne pas influencer sur leur évolution, il apparaît clairement aujourd’hui que l’homme a largement contribué à les façonner et a un rôle majeur à jouer dans leur développement futur (*Jean Bonnier, 2020 / Jean-Louis Vernet, 1997*). Ainsi, la forêt du parc, qui couvre une surface non négligeable d’environ 70 000 hectares, soit 80% du territoire, constitue un enjeu de développement majeur au sein de ce territoire.

Majoritairement constituée de résineux, comme les pins sylvestres, celle-ci se trouve encore à un stade pionnier de son évolution, ce qui la fragilise d’autant plus en rendant son évolution instable. Délaissée par la faune en raison des exploitations humaines et par les hommes ne se rendant pas compte de la nécessité de sa gestion, elle fait face seule à l’accélération inédite des changements climatiques. Ces évolutions rapides, brutales et extrêmes des conditions de vie, induites par l’homme, limitent considérablement l’adaptation naturelle des milieux. Ainsi l’effondrement de la biodiversité auquel nous assistons nous pousse à penser que les milieux forestiers présents actuellement ont besoin d’être accompagnés afin de favoriser une transformation évolutive des écosystèmes tout en limitant une importante érosion des sols, les pins sylvestres étant notamment amenés à disparaître d’ici 30 à 40 ans selon les estimations de Michel Vennetier et les publications de Forêt Méditerranéenne ; et les incendies étant favorisés par la fermeture des milieux, ou l’importante densité végétale de la forêt.

2.2.2/ Le projet

C’est pourquoi nous préconisons une ouverture progressive de ces espaces, le point de départ de cette expérience étant le plateau de Valderoure au sein duquel s’apprête à être construite une nouvelle centrale solaire. Le choix d’un tel emplacement n’est d’ailleurs pas anodin : il sera en effet possible de profiter des mesures compensatoires garanties par l’implantation future de ce projet couvrant une cinquantaine d’hectares. La zone repérée représente une surface quatre à cinq fois plus importante et permettra de tirer des conclusions particulièrement précises, validées par Jean-Pierre Clarac, paysagiste.

Initialement, ce projet, tout comme celui d'agrivoltaïsme, sera développé à l'échelle expérimentale. Dans le cas où celui-ci s'avère concluant, nous envisageons d'étendre sensiblement la zone d'implantation de cette méthode, et d'ainsi développer un tourisme familial, cette fois payant, mais aussi respectueux de l'environnement, dans une logique de sensibilisation des générations futures et de préservation des écosystèmes.

A terme, l'engorgement massif prévu sur la côte et l'attractivité retrouvée d'un parc aux forêts attrayantes devraient favoriser l'installation de nouveaux résidents prêts à être accueillis en raison de l'ouverture des espaces forestiers que nous prônons.

Parallèlement, le conséquent apport de bois garanti par la coupe de tant d'arbres justifiera la mise en place et la valorisation de chaufferies implantées dans toutes les communes du parc. La création de telles installations, menée de manière locale et nécessitant un budget raisonnable de 30 000 à 35 000 euros par chaufferie et permettant le chauffage de quelques installations mitoyennes, présente de nombreux avantages économiques, réduisant la facture électrique des communes ; environnementaux, réduisant les émissions de GES et mettant en valeur le développement des énergies renouvelables ; et sociaux, permettant la création d'emploi et renforçant le dynamisme du secteur du bois au sein du territoire. Enfin, couplée au projet d'installation de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques sur les toits des bâtiments des communes, cette proposition vise à l'autoconsommation, dimension cruciale dans les années à venir.

2.3/ Développement du photovoltaïsme

Le nouveau visage du Logis du Pin, promouvant une dynamique de territoire inscrite dans la transition énergétique, favorisera le développement de nouveaux projets, de plus en plus ambitieux et inscrits dans une logique d'autoconsommation, qui consiste à produire puis consommer directement au sein du village l'énergie issue de panneaux photovoltaïques installés sur les toits des bâtiments. Cette répartition est contractuelle plutôt que physique : les consommateurs paieront une partie de leur facture au producteur d'électricité directement. Le producteur peut vendre son électricité dans un rayon de 10 km en zone rurale. Cela implique des considérations juridiques pour gérer la répartition des ventes.

A titre d'expérimentation sur le photovoltaïque, les lieux retenus à Valderoure sont la déchetterie, la mairie, la salle rurale de la Ferrière, la maison médicale pour ce qui est des bâtiments publics ainsi que le magasin de bricolage et un hangar agricole de Stéphane Maillard, en ce qui concerne les bâtiments privés. Installer des panneaux solaires sur ces toits permettra de commencer une transition en douceur et d'introduire ces moyens de production d'énergie comme éléments constitutifs de l'architecture des toitures du Haut-Pays.

Nos estimations montrent que, dans cette configuration, l'usage d'un stockage serait inutile car la totalité de l'énergie photovoltaïque produite peut être consommée à chaque instant. On obtiendrait au mieux une autoproduction de 25% en été, et 10% en hiver.

L'étude économique présentée partie II.2.3.3/C nous montre également que les temps de rentabilité varient de dix à quinze ans selon la part réservée à l'autoconsommation dans l'énergie vendue.

Dans un second temps, nous pourrions élargir le photovoltaïque au cinquième des toitures les plus pertinentes des communes. Ce projet est estimé à 3,6 M € pour les toitures de Séranon et Valderoure. Au-delà de 20% de toitures couvertes, le coût de l'installation et la durée d'amortissement sont à des échelles trop élevées pour se révéler pertinents. Les investissements seront amortis en 11 ans et demi et engendreront ensuite une recette de 322 k€ pendant les huit dernières années du contrat conclu avec EDF. Cependant, l'incapacité du réseau à absorber les puissances fournies par les installations devra être préalablement traitée pour envisager ce cas de

figure. Cela ajoutera un coût majeur (impossible à quantifier sans devis) sans action de la part d'ENEDIS, en charge du réseau.

Cette vingtaine d'années écoulée, les panneaux solaires seront encore fonctionnels et, avec l'augmentation tendancielle du prix de l'électricité, l'autoconsommation pourrait devenir plus intéressante. Notons que l'autoconsommation collective est une piste à creuser mais nous ne possédons actuellement pas les données nécessaires à son étude précise, bien qu'elle reste éthiquement plus intéressante et plus recherchée par les acteurs de la transition énergétique. Ainsi, son implémentation ne peut être analysée qu'à l'échelle expérimentale.

De plus, cette implantation réduite au cinquième des toitures des communes limite les impacts pouvant être perçus comme négatifs au niveau du paysage.

2.4/ Les microSTEP (Station de Transfert d'Energie par Pompage)

2.4.1/ Le concept

La technologie STEP constitue une méthode de stockage d'énergie. Une telle technologie est donc très avantageuse sur les sites de production d'énergie solaire, intermittente par nature. Elle se sert de deux bassins ayant des altitudes différentes et son fonctionnement est divisé en deux phases : stockage d'énergie et restitution d'énergie. Le principe est de pomper l'eau dans un bassin en hauteur quand l'énergie est produite en excès par les panneaux solaires, puis de la turbiner quand la demande énergétique est plus forte que la production.

2.4.2/ Localisation

Nous avons sélectionné - avec Denis Blanquet, expert du CEA sur ces questions - 7 lieux potentiels pour l'installation de microSTEP sur les communes de Séranon et Valderoure. Ces lieux ont été retenus car l'installation fonctionnera en synergie avec le paysage, avec des bassins relativement petits (<1500m³) potentiellement sous forme de bêche, qui peuvent donc s'inscrire de manière discrète dans des topographies variées. De plus, les tranchées dans lesquelles passent les tuyaux nécessitent seulement un défrichement très limité et localisé de la forêt.

Enfin, les localisations retenues permettent aux bassins de STEP d'être utiles dans plusieurs domaines : le stockage d'énergie bien sûr, mais aussi le tourisme ou l'agriculture. On peut ainsi penser à un point d'eau touristique (canyoning ou lac de plaisance par exemple), ou un système d'irrigation gravitaire pour offrir de nouvelles opportunités agricoles aux piémonts à l'Adret.

2.4.3/ Le projet

Sur les figures 39 et 40 résumant ces choix, les bassins hauts sont en bleu foncé et les bassins bas en magenta. Le coût d'une telle installation est de l'ordre de 500 000€ et peut stocker une énergie d'environ 500 kWh. Des résultats plus détaillés sont disponibles partie II.2.4.

Toutefois, un frein au développement des STEP dans la région demeure : les possibilités de raccordement au réseau électrique. En effet, la capacité d'accueil du réseau ENEDIS sur les communes de Valderoure et Séranon est très limitée et l'installation d'une STEP nécessitera probablement un renforcement dont le coût est incertain.

3/ A long terme : la valorisation de la dynamique retrouvée du territoire

3.1/ Mise en place d'un méthaniseur

Etant donné que les représentants ont exprimé leur volonté de revaloriser la déchèterie de Valderoure et ont évoqué la création d'un méthaniseur, système de production d'énergie utilisant des déchets issus de l'agriculture et de l'élevage, nous avons étudié l'éventuelle implantation d'une telle installation.

Après avoir sondé les agriculteurs et éleveurs du PNR et répertorié leur méthode de production (notamment la quantité de déchets que leur culture produit annuellement), puis ainsi chiffré les intrants potentiels, il nous est apparu qu'actuellement, l'implantation d'un méthaniseur dans ce territoire n'apparaît absolument pas comme une priorité, son coût étant considérable par rapport à sa production énergétique, ce qui implique un faible retour sur investissement.

Toutefois, dans l'optique d'une redynamisation du territoire prévue par la stratégie présentée ici, il est parfaitement concevable que, d'ici quelque temps, la quantité de déchets verts récupérables à la fois via l'agriculture et l'élevage et directement à partir de la consommation des particuliers soit bien plus importante et que l'installation d'un méthaniseur sonne alors comme une évidence.

3.2/ Mobilité et déplacements sur le territoire

Finalement, la mobilité est un enjeu clef sur le territoire, comme souligné par les élus locaux à de multiples reprises. Les communes sont relativement enclavées de par la géographie du lieu et les transports en commun sont très limités. Par exemple, Madame le Maire de la Martre nous a fait part de la difficulté à organiser les transports scolaires, pourtant essentiels. De plus, les déplacements des habitants du parc représentent une pollution et un poste de consommation important pour le territoire (de l'ordre de 70% selon Renaud Dumas du PNR des Préalpes d'Azur).

Un sondage des habitants de Séranon et Valderoure nous a donné les résultats suivants sur une trentaine de réponses : plus de la moitié des individus sondés se sentent concernés par les émissions excessives dues aux transports au sein du PNR. Toutefois, ils ne considèrent pas la situation comme une priorité. Comme notre étude se veut être respectueuse des dynamiques et des volontés locales, nous avons conclu que la question de la mobilité pourrait plutôt être traitée sur le long terme, en profitant des retombées économiques, démographiques, énergétiques et socio-culturelles des autres projets. Nous pourrions alors envisager du covoiturage (40% des sondés sont intéressés) via une application dédiée commune à tous les habitants du PNR, peut-être en partenariat avec un professionnel du domaine (par exemple BlaBlaCar, eCov, Karos).

La zone du Logis du Pin pourra profiter de son dynamisme renforcé pour devenir une plateforme multimodale. Comme le territoire sera devenu producteur d'énergie, il pourra être intéressant d'y consommer l'énergie produite. Il sera possible d'y centraliser les services de location de vélos électriques déjà existants, mettre en place un système de véhicule utilitaire électrique partagé pour les courses et déplacements exceptionnels (60% des sondés y sont favorables) permettant à chaque habitant d'essayer en détail un véhicule électrique, ce qui pourrait les inciter à investir dans ce moyen de déplacement.



Figure 1 : carte de paysage reflétant l'implantation globale de nos projets sur le territoire

Pour en savoir plus sur chaque projet, veuillez continuer la lecture

Partie II : Les projets

1/ Maison de territoire

Le projet de la maison de territoire est un projet global, regroupant les communes de Valderoure, Séranon et La Martre, trois départements (04, 06 et 83) et deux PNR (Préalpes d'Azur et Verdon). Il a pour but de promouvoir ce vaste territoire en exposant son unité, son patrimoine et sa volonté de s'inscrire dans la transition énergétique.

1.1/ Déroulement de l'étude

1.1.1/ Localisation

Nous avons choisi de placer cette maison sur le hameau du **Logis du Pin**, zone hautement stratégique, à exploiter car tirant profit au maximum des différentes richesses du territoire d'étude :

- Route Napoléon (RN 85), plutôt fréquentée (en moyenne 2,5 millions de véhicules par an).
- Zone de jonction entre les trois communes, les deux PNR et les trois départements (notamment autour de 2 ronds-points sur la route Napoléon).
- Endroit déjà anthropisé, donc peu de conséquences sur le paysage et les sols.



Figure 2 : Sites étudiés pour l'emplacement de la MDP

Dans cette zone, nous avons repéré deux parcelles particulièrement intéressantes (voir figure 2).

- Une parcelle de 2 ha très dégagée et lumineuse (voir figure 3).

Elle se trouve en face d'un rond-point qui oblige les voitures à ralentir et leur laisse ainsi le temps de remarquer le bâti. Le lieu étant déjà anthropisé, le nouveau bâti pourrait s'inscrire dans une certaine continuité (station-service, Spar, future zone commerciale, hôtel Relais de l'Artuby et restaurant) sur une distance de moins d'un kilomètre.

Mais, en nous rendant sur le terrain, des contraintes topographiques sont apparues : la présence de l'Artuby à quelques mètres, le dimensionnement des infrastructures (buse d'écoulement, pont et caniveau), et le fait que toutes les constructions existantes soient surélevées de quelques mètres. Le terrain est donc potentiellement inondable.

Construire ici impliquerait des travaux supplémentaires pour limiter les risques, qui pourraient dénaturer de manière exagérée le lieu tout en entraînant des surcoûts non négligeables. De plus, les parcelles cadastrales nous indiquent que ce terrain est privé.

Nous avons donc écarté cette parcelle.



Figure 3 : Photo aérienne de l'emplacement n°1

- Une parcelle sur la RN 85 en direction du Nord où est déjà installée l'Office du Tourisme de la Martre (voir figure 4) :



Figure 4 : Photo aérienne de l'emplacement n°2

Nous disposons d'environ 1000 m² constructibles de terrain communal, devant une butte naturelle de calcaire mesurant une dizaine de mètres de haut et offrant une vue sur toute la vallée.

L'installation du projet s'inscrit dans une logique cohérente d'évolution du territoire (présence d'un Office de Tourisme / Gîte / Bistrot de pays La Merenda / primeur local ...).

Nous avons finalement retenu cette localisation pour ce projet, avec l'assentiment de Mme Raymonde Carletti, maire de la Martre, M Michel Charabot, premier adjoint au maire de Séranon et de M. Jean-Paul Henry, maire de Valderoure.

1.1.2/ Le projet

Il est apparu assez rapidement que créer une simple plateforme de vente de produits du terroir local avait été l'un des facteurs qui avait bloqué la réalisation des projets antérieurs. En effet, de telles initiatives existent déjà (Esprit de Provence qui vend des produits locaux, et primeur sur la Route Napoléon en face de l'Office du tourisme) ou sont en cours de réalisation (Maison de Pays à Castellane).

D'où les idées retenues déjà exposées précédemment : faire de la Maison du territoire une vitrine du territoire et de la transition énergétique à travers un bâtiment exemplaire énergétiquement présentant à ses visiteurs les différentes activités du territoire ; mais aussi un lieu de rencontre, regroupant différentes activités comme un espace de coworking ou une salle de réunion (n'existant pas actuellement dans ces communes).

1.2/ Mise en forme du projet

1.2.1/ Principes de construction de la maison de territoire

Nous avons imaginé un bâtiment occupant 390 m² au sol, pour une hauteur de 9 m, correspondant approximativement à la hauteur de la butte. Le bâtiment s'inscrira dans la butte - qu'il faudra donc légèrement creuser afin de profiter du caractère tampon thermique de la roche calcaire et de limiter l'impact visuel du bâtiment dans le paysage. La parcelle choisie a l'avantage de ne pas être un terrain agricole, et est assez peu boisée : l'impact sur l'environnement devrait être moindre et la maison n'empiète pas sur des sols fertiles.

Le bâtiment est composé de 3 étages (chacun haut de 3 m), et se termine par un toit-terrasse sur la butte, surmonté d'une pergola d'environ 300 m² recouverte de panneaux solaires. Le rez-de-chaussée, moins exposé au soleil à cause des arbres (qui seront conservés), sera dédié à la mise en valeur du territoire au travers par exemple d'une salle d'exposition temporaire, de vente de produits locaux... Les deux autres étages seront dédiés à des bureaux ou des espaces de coworking. Nous avons enfin envisagé la mise en place d'un puits solaire pour compenser le manque de luminosité au rez-de-chaussée.

Enfin, nous proposons la construction d'un parking au début de la butte et d'un parvis entre notre projet et le bâtiment historique, à l'emplacement de l'actuel parking.

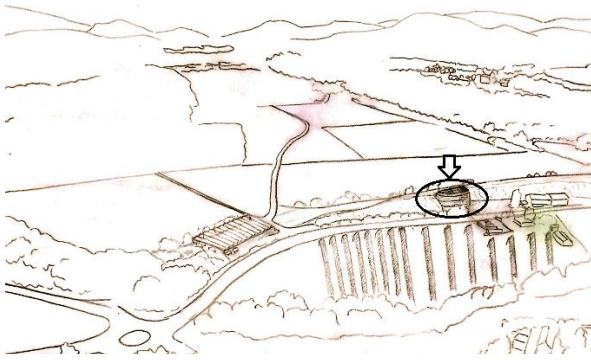


Figure 5 : Dessin de Claire Meunier montrant l'intégration de la MDP au paysage

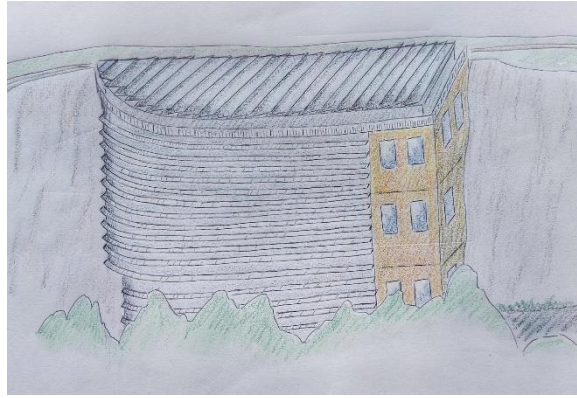


Figure 6 : Dessin de Claire Meunier montrant l'architecture et l'apparence proposées pour la MDT

1.2.2/ La maison passive

La transition énergétique passe avant tout par une réduction de la consommation d'énergie ; nous avons donc choisi de réduire au maximum les dépenses énergétiques - notamment sur les aspects chauffage et climatisation. Il s'agit donc déjà de garantir une bonne isolation et une architecture favorisant la captation du soleil.

- Nous avons d'abord calculé les **pertes thermiques** de notre projet :
 $\varphi_{pertes} = (U_m S_m + U_v S_v) \Delta T = K_{pertes} \Delta T$, U les conductances surfaciques thermiques.
 Dans notre cas, $K_{pertes} = 249 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$, ce qui donne en hiver $\varphi_{pertes} = 2,5 \text{ kW}$.
- Nous avons estimé l'**inertie thermique** de la maison : $C = V_{air} c_{V,air} + M_{béton} c_{m,béton}$ soit, dans notre cas $C = 232 \text{ kWh} \cdot \text{K}^{-1}$.

Nous avons également cherché différentes technologies à base d'énergies renouvelables qui pourraient servir à chauffer, ventiler ou climatiser la maison :

- Des **panneaux solaires photovoltaïques** ou thermiques seront disposés sur la pergola et permettront de produire de l'électricité (production estimée : 40 kWc)
- Des **larges vitres** bien isolées thermiquement (triple vitrage), exploitant au maximum les faces exposées au Sud et à l'Est pour laisser entrer le rayonnement solaire et ainsi chauffer la maison. Pour éviter la surchauffe en été, il convient de mettre des volets brise-soleil sur ces vitres.

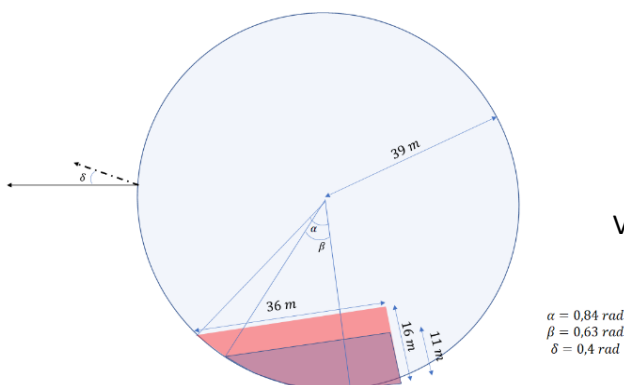


Figure 7 : Schéma de la géométrie proposée de la MDT.

Voilà, sur la figure 7, le violet correspond au rez-de-chaussée et le rouge aux premier et deuxième étages, cette distinction résultant de notre souhait d'inscrire au mieux le bâtiment dans le paysage et donc dans la butte.

Pour estimer l'énergie thermique apportée par effet de serre par les vitres, nous avons paramétré la position du soleil et intégré la projection des rayons du soleil sur la surface vitrée et dans le temps. Nous avons considéré que les arbres bloquent une partie des rayons arrivant en bas (transmission 30% ; en hiver les arbres feuillus sont nus et en été le soleil passe au-dessus des arbres), et que le soleil disparaît à midi derrière la butte.

Nous avons également dû étudier si l'on utilisait du double-vitrage ou du triple-vitrage (si ce dernier présente un coefficient de diffusion thermique plus faible, son facteur solaire est aussi réduit et donc il restitue moins d'énergie du rayonnement solaire incident).

Nous avons ainsi pu calculer théoriquement la puissance thermique entrant dans le bâtiment en fonction du rayonnement solaire direct. A partir des données d'ensoleillement durant l'année 2019, nous en avons déduit le graphe de l'énergie accumulée chaque jour par la baie vitrée :

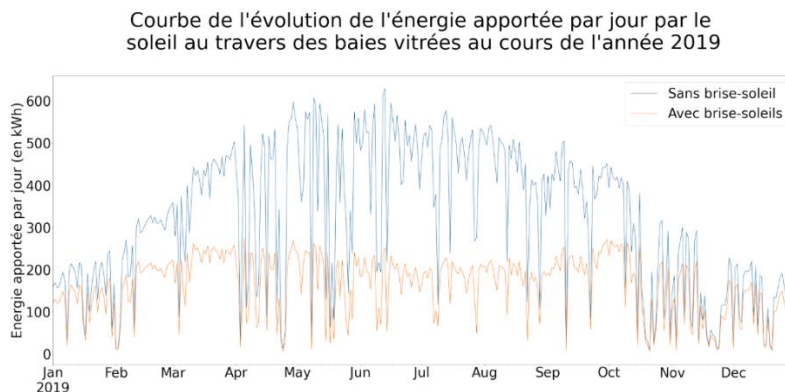


Figure 8 : Courbe de l'évolution de l'énergie apportée par jour par le soleil au travers des baies vitrées au cours de l'année 2019

En réalité, il y a des risques de surchauffe en été, d'où la mise en place de brise-soleils : des lattes blanches de 20cm de large quasiment horizontales et disposées tous les 50 cm qui bloquent totalement le soleil à midi en été, tout en laissant passer le soleil d'hiver et dont l'efficacité apparaît figure 8.

- Energie géothermique : le **puits provençal couplé à une VMC double flux**. Cette technologie permet d'assurer la ventilation de la maison tout en climatisant en été. Le puits provençal fait circuler l'air extérieur sous terre (à environ 2 m de profondeur) sur une vingtaine de mètres et exploite la constance de la température du sol (environ 12°C) pour réchauffer ou refroidir l'air selon la saison.

Un premier principe industriel appliqué à l'écoulement dans les tuyaux du puits nous donne l'équation de la chaleur $\frac{dT}{dx} + \frac{1}{l_0}(T - T_{sol}) = 0$, où $l_0 = \frac{D_m c_p}{h_{air}}$.

D'où la température de sortie du puits provençal : $T(x) = (T_{ext} - T_{sol})e^{-x/l_0} + T_{sol}$.

Après avoir récupéré les données de température moyenne de chaque journée sur l'année, on aboutit au graphe suivant qui confirme l'efficacité du système pour envoyer dans la maison une température comprise entre 15 et 18°C tout au long de l'année

Le puits apporte ainsi, couplé à une VMC double flux, une puissance

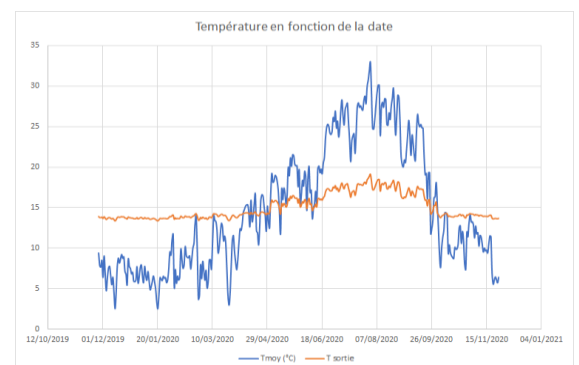


Figure 9 : Courbe de l'évolution de la température du flux d'air au cours de l'année 2019

$\Phi_{puits} = Dc_p(T_{puits} - T_{int})$,
 avec $D = 3510 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. En hiver, on prendra $T_{puits} = 20^\circ\text{C}$ (VMC) et en été, $T_{puits} = 18^\circ\text{C}$ (cf. Figure 9). A noter qu'en hiver, un puits canadien évite l'utilisation d'un dégivreur, qui consomme beaucoup d'électricité.

Afin de vérifier la viabilité de nos installations, nous avons simulé l'évolution de la température durant deux mois de l'été et de l'hiver 2019. Nous avons ainsi fait un bilan thermique global sur la maison qui nous permet d'estimer si l'on peut se contenter de ces technologies pour garder une température de confort à l'intérieur ($18\text{-}21^\circ\text{C}$), quelle que soit la période de l'année. En approximant $\Phi_{tot} = \Phi_{soleil} + \Phi_{puits} - \Phi_{pertes}$ et en supposant l'air du bâtiment thermiquement homogène, on obtient une équation différentielle :

$$\frac{dT}{dt} = \Phi_{soleil} - K_{pompe}(T_{int} - T_{pompe}) - K_{pertes}(T_{int} - T_{ext})$$

D'où les graphes suivants :

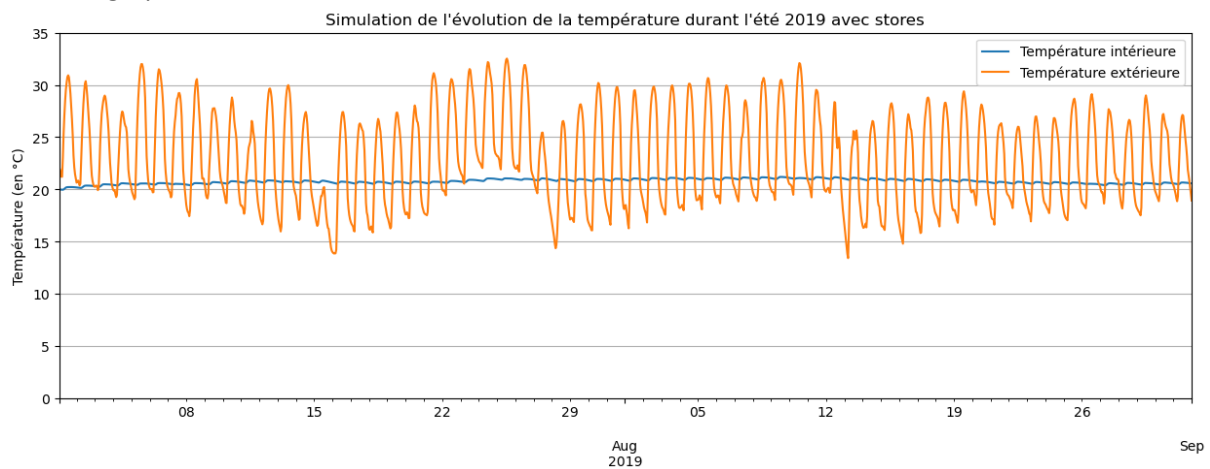


Figure 10 : Courbe de l'évolution de la température intérieure de la MDT au cours de l'été 2019 avec les stores.

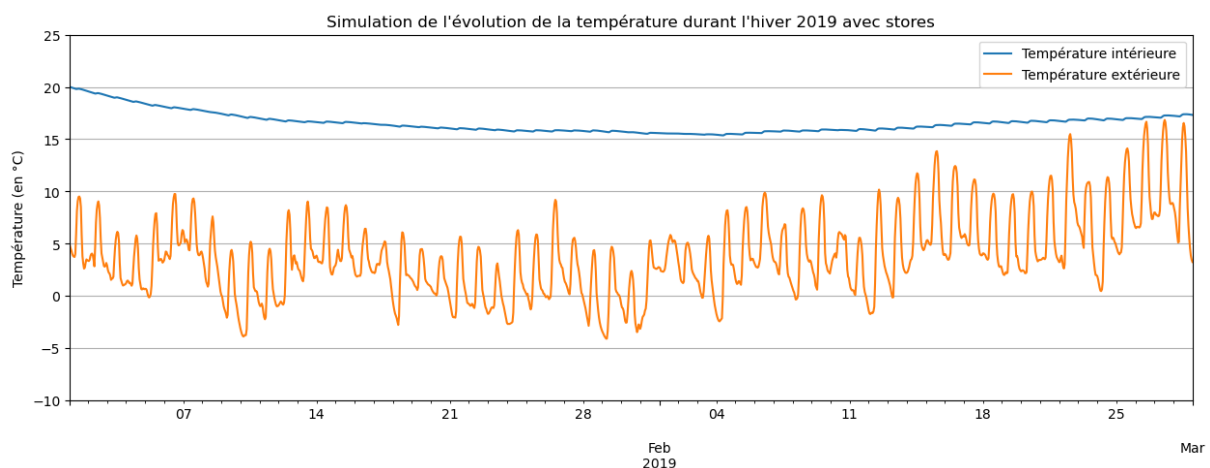


Figure 11 : Courbe de l'évolution de la température intérieure de la MDT au cours de l'hivers 2019 avec les stores.

La combinaison puits provençal / rayonnement solaire fonctionne parfaitement l'été et fonctionne assez bien en hiver – surtout dans l'avant du bâtiment exposé au soleil, et devrait donc limiter efficacement les dépenses énergétiques en termes de chauffage / climatisation.

1.2.3/ Les financements

Le projet est très ambitieux et entraîne des coûts importants :

- Construction de la maison en elle-même : 1,8 millions d'euros
- Travaux de creusement de la butte et de terrassement du parking : 50 000€
- Construction du puits canadien : 10 000€
- Pose des panneaux solaires : 120 000€

Au total, il faut donc prévoir (en comptant large) **2 millions d'euros** pour financer ce projet tel que nous l'avons imaginé.

Il s'agit donc de trouver des financements extérieurs, car les seuls budgets des communes (de l'ordre de 300 000€), et même des PNR (de l'ordre d'1 million d'euros) ne peuvent suffire. Comme le projet est novateur et servirait de base à d'autres projets liés à la transition énergétique dans la région, il rentre dans le cadre de nombreux fonds mis à disposition par la région, l'Etat et même l'Union Européenne (c'est dans le cadre de la loi sur le territoire, sachant que notre projet s'inscrit dans la dynamisation d'un territoire). Il est également possible de démarcher des entreprises privées, banques ou autres acteurs locaux pour récupérer l'argent nécessaire au financement de cette maison du territoire.

Il est très compliqué pour nous de trouver des financements dans les délais qui sont les nôtres. Nous nous contentons donc ici de donner des pistes, qui peuvent rendre le projet viable économiquement, sachant qu'une fois la maison construite, son autosuffisance énergétique permettra d'avoir des coûts d'entretien très réduits.

2/ Des projets expérimentaux

2.1/ L'agrivoltaïsme

Dans la plupart des projets d'agrivoltaïsme, les panneaux sont mobiles et asservis aux besoins de la plante. Nous souhaitons proposer une solution où les panneaux sont fixes afin de simplifier l'installation et de la rendre plus robuste dans le temps. Le but est donc d'étudier cette solution pour vérifier qu'elle n'a pas d'impact négatif sur le rendement agricole, grâce tout d'abord à des simulations informatiques puis de proposer une expérimentation aux communes qui permettrait de valider ou de nuancer les résultats de la simulation et enfin d'identifier la meilleure configuration et de la mettre en place à plus grande échelle dans les exploitations des communes.



Figure 12 : Vue d'artiste, réalisée par Claire Meunier

2.1.1/ Présentation des enjeux

Symbiose entre production électrique et production agricole

Les premières questions qui se posent sont celles de la gestion de l'ombre sur les plantes cultivées et de la concurrence entre production électrique et agriculture, la production agricole étant toujours la priorité en agrivoltaïsme.

D'après Christian Dupraz - chercheur à l'INRA - pour espérer un rendement correct, il faut capter 70% du rayonnement. Pour cela, il faut diviser la surface relative (surface de panneau / surface du terrain) de panneaux par deux par rapport à une installation classique optimisée pour la production électrique. Dans ce cas-là, les rendements agricoles relatifs par rapport à une exploitation sans panneaux solaires seraient supérieurs à 80%. Dans certains cas, en été, la présence de panneaux est même mieux adaptée à la plante.

Nous avons estimé, grâce à une photo de drone, à 56% la surface photovoltaïque relative de la centrale de Valderoure. Ainsi selon Christian Dupraz, il faudrait que la surface de panneaux vue du ciel représente 28% de la surface au sol pour une installation d'agrivoltaïsme.

Choix des plantes

Le choix des plantes cultivées sous les panneaux a été fait pour répondre à des logiques correspondant à différentes échelles (sol, climat, ombre générée par les panneaux, espèces valorisées dans le parc et dans la région, but expérimental).

Grasse, considérée comme la capitale mondiale du parfum, est située à environ 40 km de Séranon. Il semble alors intéressant de considérer la production de plantes à parfums qui seront directement valorisées sur le territoire. Après avoir considéré le jasmin de Grasse (*Jasminum officinale*) puisqu'il serait directement valorisé sur le territoire, nous l'avons abandonné car il ne correspondait pas aux conditions climatiques du parc.

L'alternative que nous proposons est la culture de la molène (aussi appelée bouillon blanc), qui est une plante haute et qui permettra de jouer le même rôle que le jasmin.

Nous proposons de plus des cultures de plantes à parfum, qui sont déjà présentes dans le parc (et donc notamment adaptées aux sols et au climat), qui poussent à la mi-ombre pour assurer une symbiose avec les panneaux. Leur production et les projets innovants qui leur sont associés sont subventionnés par la région et le parc.

De plus, l'agrivoltaïsme est une technique qui est encore théorique et selon Christian Dupraz, de tous les travaux en cours sur l'agrivoltaïsme, aucun ne concerne ni les plantes à parfum, ni le pois chiche, ce qui donne de la valeur à notre projet en termes d'expérimentation. Les plantes retenues sont donc les suivantes : violette, mélisse et angélique.

A cela, pour créer une véritable polyculture, nous ajoutons des cultures maraîchères dans les zones plus exposées et notamment du pois chiche que le parc souhaite promouvoir.

Risque incendie ?

Il s'agit également de créer des installations respectueuses de l'humain et de sa santé. Nous avons vu au cours des conférences qui nous ont été données, qu'il existait un risque d'incendie en dessous des panneaux solaires si un connecteur générait des étincelles. De plus, pour les centrales au sol en espaces naturels, d'après Denis Blanquet, les pompiers de Provence exigent une mise à blanc en dessous des panneaux. Seulement, les cultures ne sont pas considérées comme des espaces naturels et ne sont pas non plus de la matière végétale sèche puisqu'arrosées régulièrement. Nous avons aussi prévu un système de récupération des eaux de pluie (voir figure 12), qui peut servir à la fois de garantie au fait que les cultures ne sècheront pas et de source d'eau à proximité pour

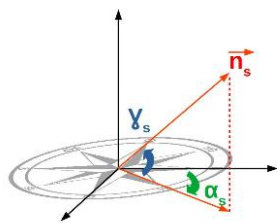
éteindre un potentiel départ d'incendie. *A priori*, il n'existe aucun risque pour l'agriculteur vis-à-vis des éventuelles étincelles ou particules incandescentes.

2.1.2/ Proposition d'expérimentation

Présentation du programme

L'inquiétude principale lorsque l'on installe des panneaux solaires au-dessus de cultures est de couper l'apport en énergie solaire aux dites cultures. Nous avons ainsi mis en place un programme qui permet de calculer l'ombre engendrée par les panneaux sur le sol.

Les hypothèses de construction du programme sont les suivantes :



- Le champ est nivelé
- Les panneaux sont modélisés par des rectangles de 1 m par 1,6 m, disposés à une certaine hauteur au-dessus du champ avec une certaine inclinaison.
- La position du soleil est donnée par deux angles (α_s et γ_s) (voir figure 13) (SoDa Web Service)

Figure 13 : Définition des angles α_s et γ_s

- L'ombre est une projection au sol du panneau selon la droite portée par le vecteur $\overrightarrow{n_s}$
- On ne considère que le soleil direct pour étudier le pire des cas.

Ainsi, à chaque instant, soit le sol est à l'ombre, soit il est au soleil. A partir de ces informations, on peut compter le nombre d'heures ensoleillées par unité de surface (nous avons pris comme unité de surface des carrées de 20 cm de côté). Et ramener ce nombre d'heure en pourcentage de temps (temps au soleil sous les panneaux / temps au soleil sans les panneaux), on appellera ce pourcentage "ensoleillement relatif" dans la suite.

De plus, nous avons envisagé de faire pousser des plantes grimpantes sous les panneaux (voir figure 14). Les plantes sont modélisées comme des panneaux verticaux et sont associées à un coefficient d'"opacité" qui varie entre 0 et 1 (0 correspond à une configuration sans plante, 1 correspond à une configuration avec un mur complètement opaque). Dans notre étude nous avons arbitrairement choisi de fixer l'opacité à 0,8.



Figure 14 : Modélisation des panneaux et des plantes grimpantes dans le programme

Grâce aux données récoltées, on peut afficher l'ensoleillement relatif sur une certaine période sous les panneaux. Les périodes choisies font 90 jours et sont centrées sur les équinoxes et les solstices. Nous avons choisi de nous placer autour des solstices et des équinoxes pour avoir des résultats plus tranchés (nous rappelons que nous ne prenons en compte que la position du soleil).

Analyse de résultats du programme et présentation des différentes configurations

Le programme a permis de mettre en évidence que l'impact des panneaux au sol en termes d'ombre était surtout concentré sous les panneaux (voir figures 15 et 16). L'ombre est déportée plus loin seulement le matin et le soir quand le soleil est bas.

Par conséquent, l'impact sur les cultures peut être contrôlé en espaçant plus ou moins les panneaux. Nous pouvons aussi faire varier l'inclinaison et la hauteur des panneaux. Nous avons aussi vu qu'incliner un peu plus les panneaux (45°) a l'avantage de libérer davantage d'espace ensoleillé, cependant la production électrique s'en verra diminuée. Augmenter la hauteur des panneaux ne semble pas avoir de conséquences sur l'ensoleillement relatif au sol et permet de garantir un espace plus important aux plantes qui poussent en hauteur.

Ainsi, nous proposons 4 configurations, qui font varier ces différents paramètres (voir figure 17).

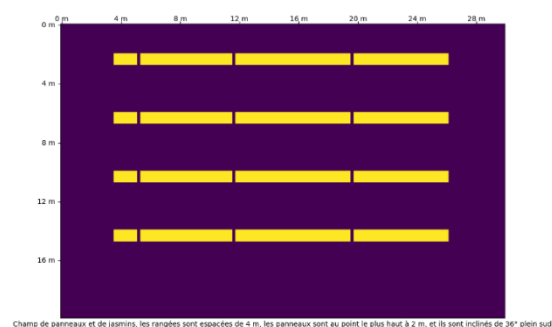


Figure 15 : Disposition des panneaux

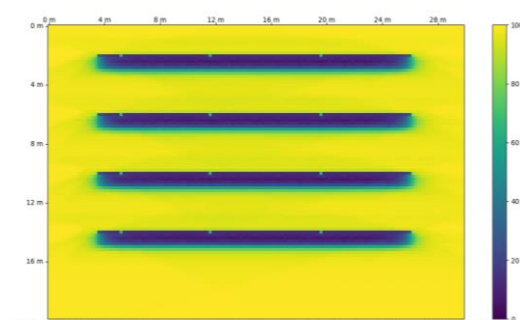


Figure 16 : Ensoleillement relatif sous les panneaux pour la configuration présentée figure 15.

Configuration	Panneaux		
	hauteur au plus haut	espacement	angle d'inclinaison
	(m)	(m)	(°)
1,00	2,00	2,00	36,00
2,00	2,00	2,00	45,00
3,00	2,00	4,00	36,00
4,00	2,70	4,00	36,00

Figure 17 : Présentation des différentes combinaisons

Position (m)	Saison 1 (%)	Saison 2 (%)	Saison 3 (%)	Saison 4 (%)
0,00	13,10	3,90	12,90	5,80
0,20	10,20	15,60	10,80	11,50
0,40	7,30	21,10	6,70	15,00
0,60	14,20	35,80	12,00	26,20
0,80	23,00	93,30	22,70	64,70
1,00	57,50	94,70	58,00	96,60
1,20	77,60	94,70	79,00	98,50
1,40	90,10	94,70	90,70	97,60
1,60	93,70	94,70	94,00	97,30
1,80	95,40	94,70	95,30	97,40
2,00	96,10	94,60	95,70	96,90
2,20	96,50	94,60	96,00	96,50
2,40	97,20	94,60	96,20	96,20
2,60	96,50	94,60	96,10	96,00
2,80	96,00	94,20	96,20	95,30
3,00	95,10	93,20	96,80	94,10
3,20	95,20	87,60	95,80	90,60
3,40	95,70	81,80	95,50	87,60
3,60	95,90	82,50	95,80	88,00
3,80	90,60	60,40	90,90	73,30

Figure 18 : Ensoleillement relatif pour la configuration 3 en fonction des saisons

Figure 19 : Résultats sur l'ensoleillement relatif en fonction des configurations

	Config 1	Config 2	Config 3	Config 4
13,10	11,90	13,00	13,00	
11,00	7,50	9,70	10,80	
4,80	6,80	7,60	6,90	
9,40	13,10	12,60	12,20	
18,90	39,80	23,10	22,40	
52,80	65,40	56,20	56,50	
74,10	82,30	77,20	76,90	
86,80	89,10	89,70	89,80	
90,70	91,30	93,60	93,70	
87,20	87,60	95,30	95,30	
		96,20	96,10	
		96,80	96,60	
		97,20	97,00	
		97,00	97,20	
		96,10	96,10	
		94,90	94,90	
		95,10	95,10	
		95,40	95,40	
		95,60	95,80	
		90,70	90,60	

Analyse des saisons dans la configuration 3

D'après la figure 18, il y a au moins 2,6 m qui sont toujours à plus de 70 % d'éclairement relatif, ce qui selon nos échanges par mail avec Christian Dupraz devrait donner un très bon rendement agricole.

Le jeu des saisons semble juste décaler la zone d'éclairement à 90 % de quelques 60 cm, ainsi que la zone à plus de 70 % de 20 à 40 cm. La moyenne des pourcentages est toujours supérieure à 70 %, ce qui est également très encourageant. Cela semble logique puisque les panneaux couvrent à

peu près 25 % de la surface du champ, en “ajoutant” les plantes montantes, il semble logique de descendre à environ 70 %.

Le jeu des saisons ne semble pas être inquiétant quant à l’installation de panneaux solaires fixes.

Réponse à la symbiose entre production électrique et production agricole

Nous avons arbitrairement décidé de placer la limite ombre/soleil à 60% puisque nous ne prenons pas en compte le rayonnement global et que nous considérons plutôt des plantes destinées à une exposition mi-ombre.

La configuration 1 correspond à une configuration optimisée en termes de production électrique et la surface de panneaux vue du ciel représente environ 41% de la surface au sol, ce qui est trop selon Christian Dupraz. Cependant, pour cette configuration, le but est de faire pousser des plantes à parfum poussant mi-ombre et la simulation prévoit 80 cm de sol exposé à plus de 60% de temps solaire entre chaque panneau. Cette configuration servira donc notamment à confirmer ou infirmer l’information donnée par Christian Dupraz pour des plantes plutôt destinées à être cultivées mi-ombre.

Dans la deuxième configuration la surface des panneaux vue du ciel représente environ 28,7% de la surface au sol ce qui devient très acceptable par rapport aux indications de Christian Dupraz.

Cette surface relative est de 20,5% pour les configurations 3 et 4, ce qui semble plus en faveur de l’agriculture que de la production d’énergie.

Selon la figure 20, plus de la moitié de la terre est consacrée à l’agriculture à partir de la configuration 2.

Configuration	Surface totale de la culture	Cultures						Coût et production (électrique)				Panneaux Surface associée aux PV
		jasmin	molène	PPAM		cultures maraîchères		Coût sans subventions	Revenu	Années d’amortissement (sans subventions)	Production à l’année	
		(m²)	(m² verticaux)	(m linéaires)	(m²)	(%)	(m²)	(%)	(€)	(€/an)	(kWh)	(%)
1,00	179,20	126,53	89,60	71,68	40,00	0,00	0,00	25200,00	2624,00	9,60	25648,00	50,00
2,00	179,20	115,84	89,60	89,60	50,00	0,00	0,00	25200,00	2589,40	9,73	25312,00	50,00
3,00	358,40	126,53	89,60	125,44	35,00	125,44	35,00	25200,00	2624,00	9,60	25648,00	25,00
4,00	358,40	189,25	89,60	125,44	35,00	125,44	35,00	25200,00	2624,00	9,60	25648,00	25,00

Figure 20 : Présentation des productions agricoles et électriques en fonction des configurations

Ainsi, nous proposons une solution où productions agricole et électrique entrent en symbiose au-dessus comme en dessous de la terre (voir figure 12). En effet, nous avons essayé de proposer différentes organisations des panneaux qui permettent à la fois aux plantes de pousser, à l’agriculteur de se déplacer (principalement dans une optique de permaculture) et de récupérer l’eau des pluies. De plus, avec une implantation verticale, les panneaux ne feront pas concurrence aux racines sous terre.

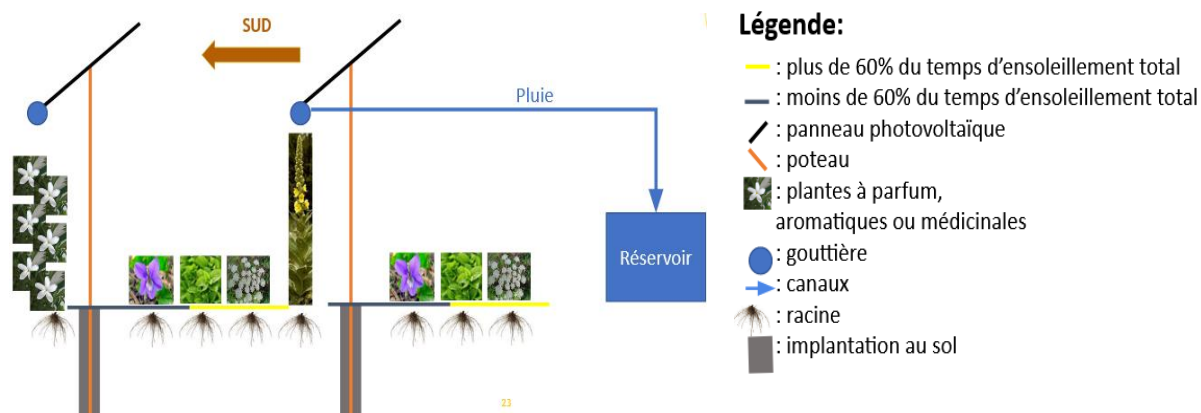


Figure 21 : Schéma de l’installation, vue de profil

Les résultats sur la pluie

Nous proposons d'installer des gouttières sous les panneaux (voir figure 12) pour récupérer l'eau de pluie et ainsi limiter l'érosion, stocker l'eau pour différer l'arrosage aux périodes les plus sèches. Cela permettra de limiter les risques d'incendie et de servir de premier apport en eau en cas d'incendie.

Dans la région PACA les précipitations sont de 900 mm/an, ce qui permet de récupérer 1018,23 L/an/panneau pour des panneaux inclinés à 45° et 1164,98 L/an/panneau pour des panneaux inclinés à 36°.

2.2/ La gestion de la forêt

2.2.1/ Le contexte

La forêt du parc naturel régional des Préalpes d'Azur représente près de 80% du territoire, soit environ 70 000 hectares : elle constitue ainsi un enjeu majeur quant à la question de la transition énergétique. Toutefois, celle-ci se retrouve aujourd'hui grandement menacée par le changement climatique : les pins sylvestres et noirs sont notamment amenés à disparaître d'ici 30 à 40 ans, selon Michel Vennetier (2015). Il s'avère nécessaire de **renforcer la capacité d'adaptation de l'écosystème au changement climatique** afin d'en prolonger l'existence et d'en valoriser les nombreux bénéfices environnementaux potentiels.

Par ailleurs, cette forêt est constituée en grande majorité de résineux. Ceux-ci, à la volonté conquérante et agressive et qui alimentent une dimension de compétition entre les espèces végétales, sont le témoin d'une forêt au stade pionnier de son évolution. Ils ont pour rôle de faire de l'ombre aux feuillus (chêne, noisetier, ...) afin de favoriser leur développement et d'atteindre l'équilibre de la forêt. Parallèlement, selon Jean-Pierre Clarac, l'urbanisation croissante a provoqué le reculement des animaux sauvages qui "entretiennent" et régulent naturellement la forêt, comme les biches et les daims. L'équilibre entre la faune et la flore étant rompu et les hommes ne remplissant pas non plus ce rôle de gestion, la forêt se referme, augmentant les risques d'incendies et diminuant la diversité des espèces présentes.

Ces différents aspects accroissent considérablement l'instabilité de la forêt, plus que jamais en danger. C'est dans cette perspective que nous avons réfléchi à des projets de gestion de la ressource forestière en collaboration avec les acteurs du Parc.

2.2.2/ Le projet : la mycosylviculture

Jean-Pierre Clarac, paysagiste, nous a mis sur la piste de la mycosylviculture comme projet de gestion forestière. La mycosylviculture est le développement de cultures de champignons favorisant la biodiversité des sols et du milieu et à terme permettant une évolution positive de la forêt.

Nous proposons de développer ce projet à titre expérimental dans un premier temps afin de valider ses effets positifs sur l'évolution de la forêt. Nous souhaitons l'implanter sur le plateau de Valderoure (voir figure 22), près de la future centrale photovoltaïque afin de bénéficier des mesures compensatoires liées au défrichement causé par ce projet. Il est souhaitable de prévoir un terrain de 200 à 400 hectares qui contienne suffisamment de microrégions différentes afin de pouvoir comparer les effets de la mycosylviculture sur ces différents endroits. Voici les étapes que nous souhaitons mettre en place afin de mener à bien ce projet :



Figure 22 : Illustration du plateau de Valderoure fournie par Joris Masafont

1. Ouvrir la forêt en défrichant trois pins (espèce conquérante menacée) sur cinq. Cette démarche permettra de diminuer le risque d'incendies et la compétition entre espèces.
2. Il est important de ne retirer que les bûches des arbres et de laisser le reste sur place. En effet, ces éléments auront un rôle d'éponge en cas de pluies empêchant l'inondation des plaines et l'érosion des sols et favorisant la biodiversité et la fertilité du milieu. Pour cela, ces éléments peuvent soit être épandus aléatoirement, soit disposés orthogonalement à la pente afin de créer des "murs" contre le ruissellement de la pluie et d'épaissir les sols.
Afin de ne générer aucun déchet, nous prévoyons de réutiliser les bûches d'arbres à l'utilisation des chaufferies à bois déjà présentes sur le territoire, ou bien nouvellement implantées ainsi qu'à un éventuel projet de méthanisation (cf. parties suivantes).
3. Le sol ainsi épaissi et plus fertile est favorable au développement de champignons.
4. Les conditions sont désormais favorables à l'émergence des feuillus (espaces, ombres par les pins restants, sol fertile) et la forêt accompagnée est moins menacée.

L'idée est ensuite de favoriser, par l'intervention humaine, la pousse régulière des champignons afin d'en faire un parc de cueillette proposant des activités de sensibilisation autour de la gestion de la forêt. Ces parcs existent déjà dans d'autres forêts méditerranéennes en Espagne et en Italie. D'après une étude de l'*Association de la forêt et des espaces naturels forestiers méditerranéens* (Boglio D. & al, 2014), sur 16 parcs de mycosylviculture, 14 ont un chiffre d'affaires positif. Si cette expérience fonctionne, les recettes de ce parc permettront à terme d'étendre ce projet de gestion à une plus grande partie de la forêt.

2.2.3/ La chaufferie à bois

Nous souhaitons utiliser les bûches récupérées par le projet de mycosylviculture pour l'utilisation des chaufferies à bois. En effet, la vente de pin sylvestre pour l'utilisation de bois-matériaux n'est que très peu rentable et des chaufferies sont déjà présentes sur le territoire. De plus, aujourd'hui seuls 5 à 10% de la croissance forestière sont exploités au sein du parc. Il serait donc tout à fait possible de créer de nouvelles installations pour une utilisation locale du bois sans fragiliser le développement de la forêt.

Cette solution offre différents avantages :

A l'exception de l'énergie solaire, l'énergie issue de la biomasse se trouve être la plus accessible économiquement aujourd'hui, et cette tendance devrait se renforcer dans les années suivantes, ce mode d'exploitation d'énergie étant indépendant de l'évolution du prix des énergies fossiles. En outre, à l'échelle locale, sa gestion est raisonnable et ne requiert pas un budget conséquent. Il est d'ailleurs envisageable de bénéficier d'une subvention à plus de 50% du département et de la région, qui valorisent les exploitations respectueuses de l'environnement et créatrices d'activité, si divers critères, comme un retour sur investissement compris entre 5 et 15 ans, sont respectés.

Cette énergie, puisque renouvelable et dépendant d'une ressource disponible en très grande quantité, présente en outre des avantages environnementaux. Elle renforce l'autonomie énergétique

des communes en promouvant l'autoconsommation. Parallèlement, si les chaufferies d'antan, voire les cheminées ou les inserts, étaient responsables d'une émission considérable de particules fines ; les nouvelles, bien plus petites et adaptées à une exploitation locale, mais aussi équipées de filtres dont l'efficacité est en constante amélioration, présentent des émissions drastiquement diminuées, comme l'affirme Serge Léonard, ingénieur conseil en chauffage 100% renouvelable. Enfin, le bilan carbone de cette pratique peut être considéré nul dans la mesure où celui-ci émet la même quantité de CO₂ en se décomposant, cette émission étant d'ailleurs réduite dans le cas considéré puisque quantité de déchets sont laissés sur place.

L'implantation de chaufferies présente finalement des avantages sociaux notables. En effet, elle permet le recrutement de personnes afin de s'en occuper, mais dynamise également le territoire en renforçant la demande en bois, ce qui donne du travail aux bûcherons par exemple.

A l'échelle locale, en s'inspirant du projet réalisé à Pierrefeu en 2018 au niveau de l'école et la mairie, il est possible d'envisager de créer des chaufferies pour alimenter en énergie quelques bâtiments mitoyens en réservant une surface réduite, de l'ordre de 10 à 20 m² pour un budget compris entre 30 000 et 35 000 euros. La solution bois-énergie permet alors des économies de fonctionnement de l'ordre de 1 500 à 2 500 euros par an en comparaison avec l'énergie électrique issue du réseau, ce qui assure un temps de retour sur investissement inférieur à 15 ans et garantit les subventions promises par les différentes entités évoquées.

Afin de maximiser le potentiel énergétique d'une telle opération, la rénovation des bâtiments chauffés s'avère cruciale. En outre, la production d'énergie issue de la biomasse est extrêmement dépendante de la proportion d'humidité du bois : celle-ci diminue en effet considérablement (cf. figure 23) avec la quantité d'eau. Il apparaît donc également nécessaire de prévoir des emplacements dans lesquels le bois sera stocké et bûché avant combustion, et ce pendant un an en moyenne. Un passage de 45% d'humidité à 20% d'humidité d'une bûche, particulièrement envisageable via le séchage du bois, permet par exemple de réduire de moitié le coût du kWh, celui-ci passant de 10 à 5 centimes, renforçant sensiblement les effets économiques notables de l'implantation de chaufferies.

% H2O	Résineux		Feuilleux	
	KJ/Kg	kWh/Kg	KJ/Kg	kWh/Kg
0	19 186	5,33	18246	5,07
5	18 101	5,03	17208	4,78
10	17 017	4,73	16170	4,49
15	15 932	4,43	15133	4,20
20	14 847	4,12	14095	3,92
25	13 763	3,82	13057	3,63
30	12 678	3,52	12020	3,34
35	11 593	3,22	10982	3,05
40	10 509	2,92	9944	2,76
45	9 424	2,62	8907	2,47
50	8 339	2,32	7869	2,19
55	7 254	2,02	6831	1,90
60	6 170	1,71	5793	1,61
65	5 085	1,41	4756	1,32
70	4 000	1,11	3718	1,03
75	2 916	0,81	2680	0,74
80	1 831	0,51	1643	0,46
85	746	0,21	605	0,17

Figure 23 : Energie massique produite par la combustion d'un arbre en fonction de son humidité

En considérant alors un apport -plus qu'envisageable- de 12 tonnes de résineux par an, ayant un taux d'humidité de 20%, une production de 50 000 kWh par an est ainsi possible avec une telle chaufferie, permettant l'approvisionnement d'une dizaine de foyers ou de quelques bâtiments mitoyens.

2.3/ Le développement du photovoltaïsme

2.3.1/ Besoin en électricité

Afin de dimensionner la taille des infrastructures à envisager, il a fallu estimer la consommation électrique des deux communes.

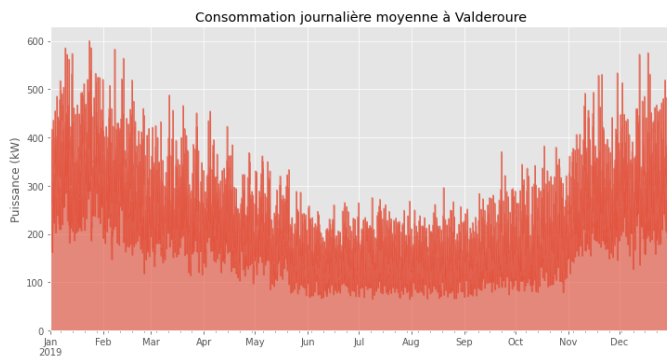


Figure 24 : Consommation moyenne journalière à Valderoure

Pour cela, nous avons traité les données fournies par Enedis grâce à la bibliothèque Pandas de Python. En combinant la thermosensibilité de la commune avec l'ensoleillement annuel reçu et la consommation d'énergie d'un foyer type, il est possible de simuler une consommation horaire sur une année. Nous avons ensuite ajouté du bruit pour modéliser les variations selon les foyers, ce qui nous donne les résultats ci-contre à l'échelle de la commune.

On observe une diminution de la consommation en été, et des pics hivernaux attendus.

Finalement, la consommation s'élève à $7,86 \times 10^6$ kWh par an. On obtient donc le dimensionnement du besoin sur la commune de Valderoure (le même raisonnement peut s'appliquer à celle de Séranon).

Seulement la fluctuation de la production solaire nous impose de considérer les données plus en détail et d'établir des profils journaliers afin de répondre au mieux à la demande des consommateurs.

En regroupant les données par trimestre, on obtient :

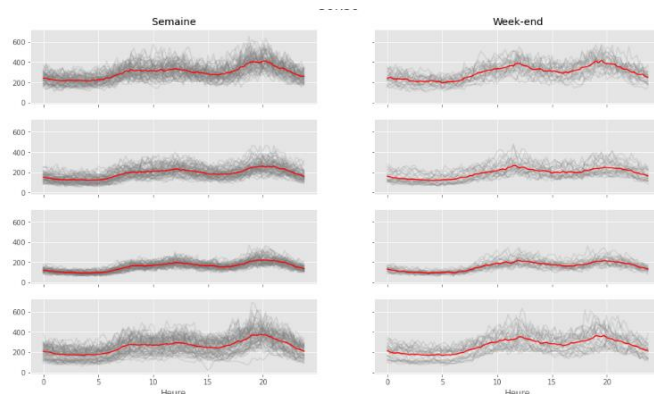


Figure 25 : Profil journalier de consommation

Nous retrouvons les deux pics de consommation le matin et le soir durant la semaine, et une variabilité plus importante les week-ends, ce qui semble cohérent avec ce qui peut être attendu. Seulement ceux-ci ne correspondront pas nécessairement aux pics de production d'énergie photovoltaïque, ce que l'on verra avec les simulations de production photovoltaïque.

2.3.2/ Evaluation de la ressource solaire

Pour répondre à la demande des maires, nous nous sommes concentrés sur la ressource solaire abondante dans la région. Mais comment l'évaluer ?

Puissance et rendement d'un panneau solaire

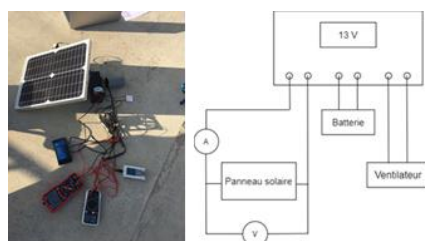


Figure 26 : Dispositif expérimental

Nous avons mesuré la tension aux bornes du panneau et l'intensité qui y circule pour différentes orientations de celui-ci. La puissance par mètre carré issue du Soleil et reçue

par le panneau a également été mesurée à l'aide d'un solarimètre, solidaire du panneau, de sorte qu'ils aient tous deux la même orientation. Les mesures ont été réalisées avec la batterie pleine ou non, quelques mesures étant effectuées avec une partie du panneau ombragée.

Le rendement moyen est de 6,6 % lorsque la batterie est pleine et 10,7% lorsque la batterie n'est pas pleine. Lorsqu'une partie du panneau est ombragée, les rendements chutent énormément (respectivement 0,1% et 3,4% quand la batterie est pleine ou non).

Cela s'explique par le fait que les cellules photovoltaïques sont en série. Lorsque l'une ne produit plus, elle utilise l'énergie des autres pour fonctionner, ce qui est empêché dans les panneaux effectivement installés.

coef directeur batterie pleine= 0.11667233709571068
coef directeur batterie vide= 0.06626060581785875

Puissance délivrée par le panneau en fonction de la puissance reçue

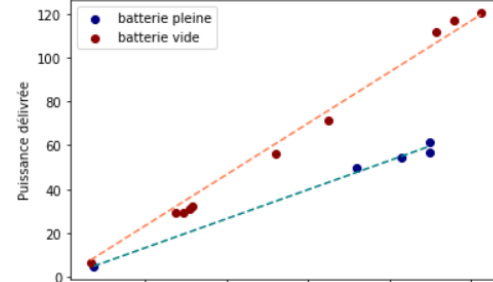


Figure 27 : Puissance délivrée par le panneau en fonction de la puissance reçue

Pyranomètre

Le pyranomètre permet de mesurer l'intensité du rayonnement du soleil direct, sans prendre en compte le rayonnement diffus, du fait de la faible ouverture angulaire.

Le flux du soleil s'écrit $\Phi = \frac{P}{A} = \frac{E}{A t} = \frac{mc(T(t) - T_{initiale})}{A t}$

- A la surface du disque en aluminium
- m la masse du disque d'aluminium

la capacité calorifique de l'aluminium

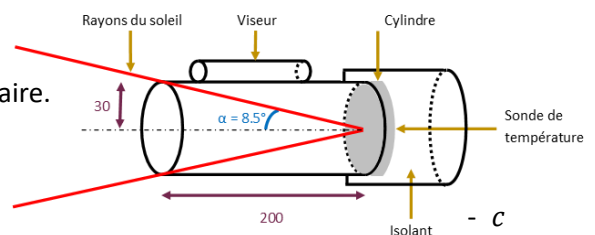


Figure 28 : Schéma d'un pyranomètre

Le premier point sur la courbe, correspondant au minimum de pertes thermiques, donne un rayonnement de 542 W/m². Pour la même mesure du rayonnement direct avec le solarimètre, on obtient 660 W/m². La différence peut venir de la mauvaise isolation du pyranomètre et des incertitudes liées à la mesure de la température.

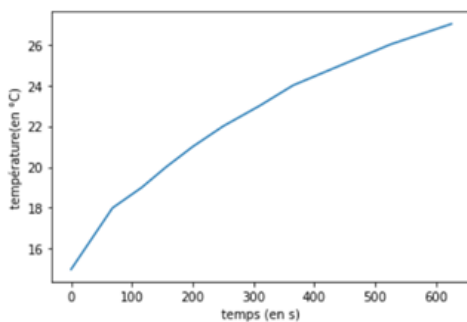


Figure 29 : Température du cylindre d'aluminium en fonction du temps

De plus, le rayonnement total est de 740 W/m², ce qui correspond à une journée peu ensoleillée. Le rayonnement diffus est donc de 80 W/m². Les valeurs de rayonnement obtenues seront utiles dans la future modélisation de la production potentielle des installations. En effet, la mairie a tout intérêt à produire de l'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques car bénéficiant d'une région recevant une puissance solaire importante au sol. Pour le faire dans un élan dynamique, nous avons étudié un projet d'autoconsommation collective alliée à une revente partielle à EDF.

2.3.3/ Mise en place du projet

Qu'est-ce que l'autoconsommation ?

Le terme d'autoconsommation correspond à la quantité d'énergie électrique effectivement consommée par les habitants par rapport à celle produite. En effet, nous avons initialement remarqué que les pics de consommation ne correspondent pas forcément à ceux de production.

Nous pouvons alors avoir du surplus qui sera revendu ou non suivant les plans économiques établis. Nous définissons conséquemment la notion d'autoproduction, qui quantifie la fraction d'électricité issue de l'autoconsommation dans la facture d'un client, par rapport à sa consommation totale.

A l'échelle de Valderoure

A. Choix des emplacements

Nous retrouvons la localisation des bâtiments retenus pour implanter les panneaux, énumérés dans la stratégie.



Figure 30 : Emplacements choisis pour l'étude

B. Estimation de la production des bâtiments

Afin de déterminer le potentiel de production de ces bâtiments en fonction de la date précise, nous nous sommes procurés des données sur l'angle et la direction des toits (au m² près) grâce à Etienne Wey, directeur général de Transvalor Innovation.

Puis, à l'aide de la base de données soda-pro, nous avons pu recueillir les données d'irradiation solaire en fonction du temps pour une inclinaison horizontale. A l'aide d'un modèle mathématique et de ces données (BHI = irradiation directe horizontale, DHI = irradiation diffuse horizontale, GHI = irradiation globale horizontale), nous pouvons calculer l'irradiation globale reçue par un toit pour n'importe quelle inclinaison : le GTI (Irradiation globale inclinée) (Liu, Jordan, 1960).

$$GHI = BHI \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_s)} + DHI \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + GHI \rho \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

où : $\cos(\theta_i) = \cos(\beta)\cos(\theta_s) + \sin(\beta)\sin(\theta_s)\cos(\alpha - \alpha_s)$; $\cos(\theta_i) > 0$; $\cos(\theta_s) > 0$
 $\rho = 0,15$: albédo ; β : Inclinaison du Toit ; α : Orientation du toit ; θ_s, α_s : angles solaires

A l'aide de Python et de la librairie Pandas, nous avons simulé la production électrique sur la toiture des 5 bâtiments. Pour cela, nous avons supposé que ¼ de la surface disponible puisse être exploitée au niveau des bâtiments ayant une toiture de surface supérieure à 50 m², contre ¼ pour les autres bâtiments.

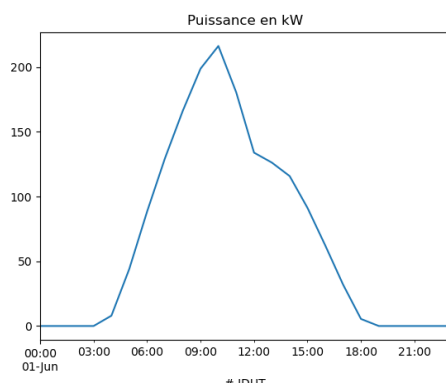


Figure 31 : Puissance en kW pour le 01/06/2019

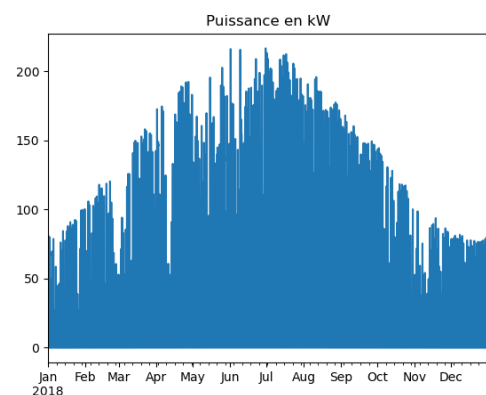


Figure 32 : Puissance en kW pour l'année 2019

Ci-dessus, nous observons l'intermittence de l'énergie solaire, ainsi que sa dépendance saisonnière. Il est ici intéressant de superposer cette production avec la consommation d'énergie estimée des habitants pour analyser la question du stockage d'énergie et de l'autoconsommation.

Le graphique ci-contre montre la part d'autoconsommation dans la consommation électrique de Valderoure. L'énergie produite est complètement utilisée, mais elle ne correspond au mieux qu'à ¼ de la demande énergétique (juin), ce qui reste assez faible. On observe sur ces graphiques que l'utilisation d'un stockage pour l'autoconsommation serait inutile pour cette configuration car la totalité de l'énergie photovoltaïque disponible à chaque instant serait consommée.

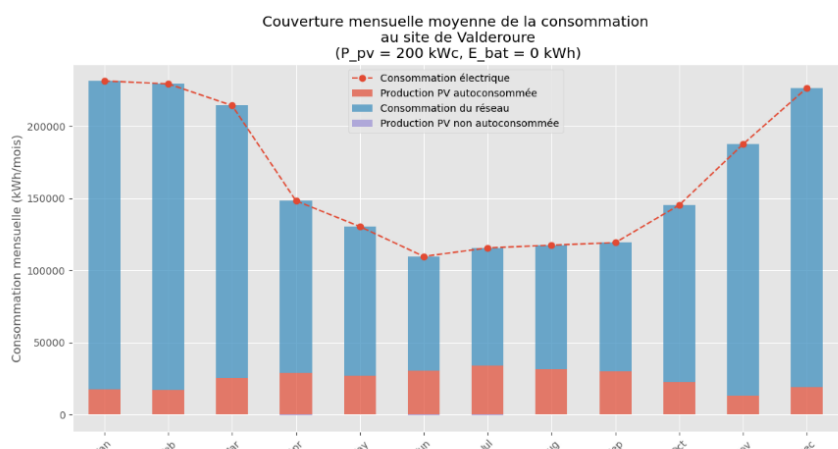


Figure 33 : Couverture mensuelle moyenne de la consommation au site de Valderoure

C. Simulation économique

Nous nous sommes appuyés sur l'étude de Hubert Remillieux travaillant chez EnOTe et ayant mis en place un projet d'autoconsommation dans une autre commune dans la Drôme (Hubert Remillieux et al, 2019).

En achetant les panneaux photovoltaïques en France auprès de SYSTOVI (avec pose et onduleur inclus) nous estimons les prix à 1,5 €/Wc. A cela s'ajoute la location éventuelle des toits privés (estimée à 2,25 €/m² par mois).

Ensuite, il a fallu établir un plan pour rentabiliser le plus rapidement l'installation, tout en maximisant l'autoconsommation d'électricité. Afin de pouvoir trouver des financements au projet et assurer un retour sur investissement pour la mairie, il est nécessaire d'avoir une partie de l'électricité revendue à EDF à 0,12€/kWh fixe sur 20 ans, même dans le cas de l'autoconsommation. Nous avons ainsi effectué plusieurs simulations pour trouver le meilleur compromis et comparer le temps de rentabilité des 2 solutions (revente totale ou partielle).

La simulation s'appuie sur les modélisations d'ensoleillement pour chaque bâtiment permettant d'obtenir la puissance moyenne reçue par heure pendant un an.

	Batiment	Cout location toit	Cout initial	Revenu RT	Rentabilité RT en années	Revenu AC	Rentabilité AC en années
0	Biblio	0.0	7050.0	817.0	8.60	517.0	13.60
1	Brico	582.0	21825.0	2635.0	10.60	1669.0	20.10
2	Medic	0.0	39300.0	5114.0	7.70	3239.0	12.10
3	Hangar	1946.0	218925.0	28732.0	8.20	18197.0	13.50
4	Salle	0.0	27975.0	2280.0	12.30	1444.0	19.40
5	Total	2528.0	315075.0	39578.0	9.48	25066.0	15.74

Figure 34 : Analyse économique de l'installation des panneaux

Il faut ensuite scinder le raisonnement en fonction du scénario considéré. Pour une revente totale (RT), il suffit de multiplier l'énergie produite par le prix de rachat d'EDF. Pour un modèle avec une part d'autoconsommation (AC), on considère 15 % d'autoconsommation vendu au prix de 0,065 €/kWh, les 85% restants étant vendus au prix de rachat d'EDF.

Dans le cas de la revente totale, le temps de rentabilité des installations est d'un peu moins de dix ans en moyenne. S'il y a de l'autoconsommation, il augmente et tend vers la quinzaine d'années.

Elargissement du projet

A. Utilisation de plus de bâtiments

Nous avons ensuite élargi notre simulation à l'ensemble des bâtiments de Valderoure et Séranon. A l'aide de la librairie Python Geopandas, nous avons regroupé les données de chaque m² de toiture en 1600 bâtiments, en considérant que tous les toits ont une inclinaison moyenne valant 26,9°. Les toits orientés nord ont été supprimés car leur production est négligeable, et les toits restants ont été choisis orientés vers le sud.

Nous avons ensuite lancé la simulation de production photovoltaïque pour obtenir pour chaque bâtiment la puissance crête reçue ainsi que l'énergie en kWh obtenue sur une année.

B. Simulation économique

Nous avons alors simulé avec Pandas, pour une proportion de toits donnée, en commençant par les bâtiments les plus rentables, les aspects économiques. Nous pouvons ainsi proposer un plan sommaire mais modulable aux maires en fonction de leurs besoins. On obtient, pour 80% de reventes à EDF et une perte de 15% de l'énergie allouée à l'autoconsommation avec un prix moyen de location des toits de 1,5€/m² par mois (la première colonne correspondant au pourcentage de toits utilisés) :

	Cout installation (en €)	puissance installée (en kWc)	Proportion d'autoproduction (en pourcentage)	Durée d'amortissement (en années)	Recettes ensuite par an jusqu'à 20 ans (en €)
0.1	1,843,950.0	1,843.95	10.22	14.83	124,338.8
0.2	3,680,400.0	3,680.4	20.4	14.84	247,973.68
0.3	5,910,000.0	5,503.5	30.56	15.87	372,377.53

Nous avons également simulé un projet de revente totale à EDF, toutes choses égales par ailleurs :

	Cout installation (en €)	puissance installée (en kWc)	Durée d'amortissement (en années)	Recettes ensuite par an jusqu'à 20 ans (en €)
0.1	1,843,950.0	1,843.95	11.42	161,444.08
0.2	3,680,400.0	3,680.4	11.43	322,008.0
0.3	5,910,000.0	5,503.5	12.23	483,285.6

Ainsi, on constate que la revente totale à EDF semble être la plus intéressante économiquement parlant, avec des durées d'amortissement plus courtes et des recettes augmentées de presque 100 000€/an par rapport à l'autoconsommation, du moins pour les 20 premières années d'utilisation.

Nous nous sommes également intéressés aux préoccupations d'intégration au paysage, qui tiennent particulièrement à cœur aux habitants du parc et avons simulé les zones où seraient implantés les panneaux en fonction du pourcentage de toitures recouvertes.

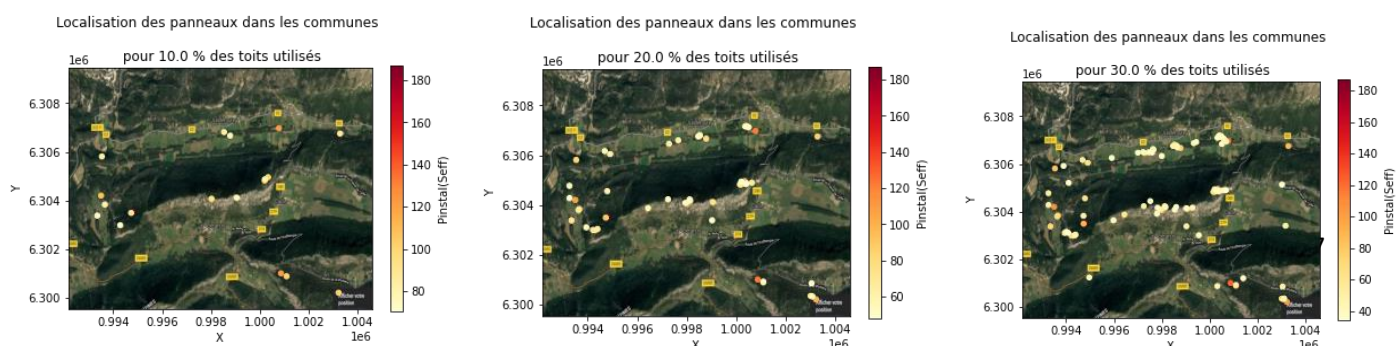


Figure 35 : Implantation des panneaux en fonction du pourcentage des toits utilisés

Nous constatons que l'impact des trois cas de figure considérés sera négligeable à l'échelle du territoire, d'autant plus que les bâtiments sélectionnés en priorité ont de grandes toitures (hangars, magasins...) et n'ont pas d'intérêt architectural particulier. Nous pouvons envisager une telle implantation sans craindre de perdre le patrimoine des communes.

2.3.4/ Point d'attention prioritaire du projet : renforcer le réseau des communes

Pour pouvoir fonctionner hors autoconsommation individuelle, le système devra être relié au réseau géré par ENEDIS (e.Lios, 2020). En fonction de la zone voulue de raccordement (une zone comprend 3 à 4 bâtiments en règle générale), le réseau peut accepter une installation de panneaux photovoltaïques de 0 à 30 kW environ. Si l'on souhaite installer un système de puissance supérieure, il faudra payer un supplément pour renforcer le réseau.

Dans le cas des bâtiments sélectionnés précédemment, le réseau est souvent un facteur limitant important. Cependant, cette limitation est à mettre en perspective avec la puissance crête de l'installation : un panneau photovoltaïque produit rarement au maximum de sa capacité. Il s'agit alors de trouver un équilibre entre le prix du renforcement du réseau et la perte d'énergie, à cause d'un possible écrêtage, si l'installation est reliée au réseau actuel.

Bien qu'aujourd'hui la solution de revente totale à EDF semble plus compétitive que l'autoconsommation comme indiquée dans la stratégie, l'augmentation certaine du prix de la vente de l'électricité aux consommateurs par EDF dans les années à venir reste inconnue et peut rendre l'autoconsommation collective bien plus rentable. Ainsi, nous proposons en ouverture un scénario expérimental supplémentaire permettant d'appliquer et d'étudier une autoconsommation collective : afin de faire évoluer les choses il faut savoir assumer une prise de risque. Nous avons estimé que les 3 bâtiments se situant à la Ferrière étaient propices à l'autoconsommation collective, leur petit nombre permettant d'implémenter et d'étudier finement la solution avec un faible investissement qui sera dans tous les cas rentabilisé (mais peut-être moins vite que dans le cas d'une revente totale à EDF). L'expérience permettrait la récolte de données sur l'autoconsommation, qui est à ce jour faible, et de potentiellement faciliter l'extension de la solution.

2.4/ Les microSTEP pour stocker l'énergie

Le recours croissant à des solutions de production d'électricité intermittentes, dont le solaire, constitue une source de fragilité pour l'approvisionnement en électricité. Les fluctuations de production, liées à une dépendance météorologique, sont indépendantes de la consommation. Il faut donc faire face à des situations de surproduction d'électricité en heures creuses et des moyens de production sur lesquels on ne peut pas compter lors des pics de consommation. Le développement de moyens de stockage constitue donc un enjeu majeur pour une transition vers un mix énergétique plus renouvelable. C'est aussi un moyen d'améliorer la résilience du réseau et de sécuriser l'approvisionnement en électricité d'un territoire.

Sur les communes de Séranon et Valderoure, le potentiel solaire important rend la question du stockage primordiale. Plusieurs atouts de leurs territoires, dont le relief et la présence d'eau, nous ont conduits à proposer un système de stockage sous forme de micro-STEP (Station de Transfert d'Energie par Pompage). Ces systèmes ont l'avantage d'utiliser une technologie plus mature que celle des batteries et d'avoir une durée de vie importante ce qui fait d'eux un des moyens de stockage les moins coûteux.

Le principe d'une STEP est de pomper de l'eau pendant des périodes de surproduction d'énergie, à partir d'un réservoir vers un autre réservoir situé en hauteur par rapport à l'autre (plus de 100m de dénivelé doivent séparer

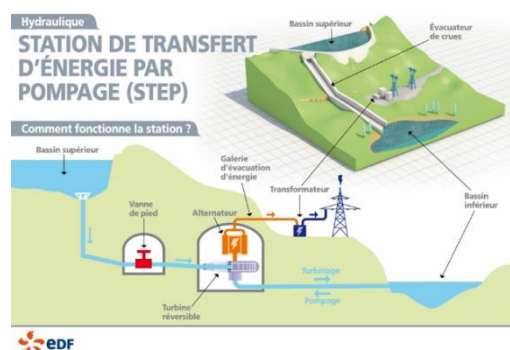


Figure 36 : Schéma de fonctionnement d'une STEP

les deux bassins). L'énergie est alors stockée sous forme d'énergie potentielle :

$$E = \rho V g h$$

avec h la hauteur du deuxième bassin par rapport au premier, ρ la masse volumique de l'eau, V le volume d'eau contenu dans le bassin en hauteur, g l'accélération de pesanteur (Viollet, P.-L, 2014)

Pour récupérer l'énergie électrique, quand la production d'énergie ne satisfait pas la demande, il suffit de faire passer cette eau par une turbine.

2.4.1/ Implantation des micro-STEP dans le territoire

Etude des lieux et des enjeux du territoire

Pour réaliser notre projet, nous avons commencé par repérer des lieux potentiels d'installation de STEP sur les communes de Valderoure et Séranon sur la plateforme Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr>), en utilisant les cartes IGN, et particulièrement les lignes de niveaux qui y sont indiquées. En effet, l'installation d'une microSTEP nécessite un plateau, qui se caractérise

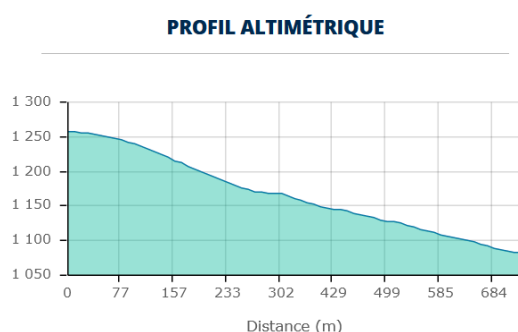


Figure 37 : Exemple de profil altimétrique

par un écartement des lignes de niveaux sur les cartes IGN. De plus, Denis Blanquet, chercheur au CEA se concentrant sur le développement de cette technologie, est intervenu auprès de nous et nous a indiqué les dimensions classiques d'une microSTEP, notamment le dénivelé minimal nécessaire, qui est d'une centaine de mètres. Nous avons donc évidemment retenu ce critère pour sélectionner les parcelles qui nous semblaient intéressantes sur les deux communes. Enfin, le coût linéaire d'installation des tuyaux étant relativement élevé (environ 50€ le mètre d'après D. Blanquet), il est important d'éviter

les zones de faible dénivelé, qui nécessitent de grandes longueurs de tuyaux, et donc un investissement conséquent, pour peu de gain de hauteur. Ces zones sont repérables grâce aux lignes de niveau, mais pour plus de précision nous avons utilisé la fonctionnalité de Géoportail qui permet d'établir des profils altimétriques. Par exemple, le profil suivant est particulièrement intéressant, le dénivelé étant d'environ 160 mètres, et la pente restant relativement forte tout le long du profil. Enfin, les bassins qui stockent l'eau doivent être accessibles aux engins de chantier, en particulier ceux situés en altitude. Nous avons donc également vérifié sur les cartes IGN la présence de pistes de Défense de la Forêt Contre les Incendies (DFCI), ou de pistes assez larges sur les vues aériennes.

Les bassins de STEP peuvent aussi avoir un autre usage que le stockage d'énergie dans d'autres secteurs, comme le tourisme ou l'agriculture. On peut ainsi penser à un point d'eau touristique (comme le lac de Thorenc), ou un système d'irrigation gravitaire, qui dans notre cas d'étude a retenu l'attention du maire de Valderoure. C'est un des critères auxquels nous avons pensé pour évaluer les endroits intéressants pour installer nos STEP. De plus, en fonction de la consommation des personnes dépendantes de la STEP, il pourrait être intéressant d'exploiter ces installations dans un modèle d'autoconsommation. Il s'agirait alors de faire une injection écrêtée de la puissance photovoltaïque (dans notre cas d'étude) sur le réseau, et de stocker la puissance au-dessus d'un certain seuil.

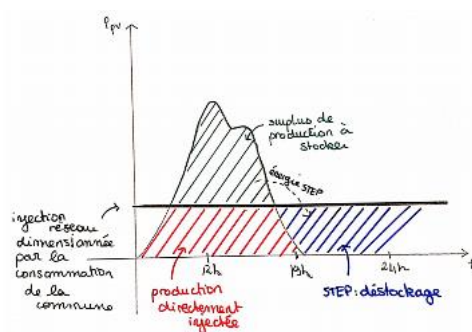


Figure 38 : Schéma d'un modèle d'autoconsommation

Choix d'endroits de typologies différentes sur Valderoure et Séranon

En prenant en compte tous ces éléments, nous avons sélectionné 7 lieux potentiels pour l'installation de microSTEP sur les communes de Séranon et Valderoure. Sur les cartes résumant ces choix, les bassins hauts sont en bleu foncé et les bassins bas en magenta.



Figure 39 : Emplacements sélectionnés pour l'installation de STEP sur la commune de Séranon

Pour le projet au nord-ouest, nous avons remarqué que depuis le point haut, deux points bas étaient accessibles. Nous avons donc eu l'idée d'une STEP double, avec un bassin haut surdimensionné pouvant se vider dans les deux bassins bas en fonction de la demande.

De plus, au cours d'une de nos rencontres avec les élus de Séranon, ceux-ci ont évoqué leur projet de faire un bassin de rétention des eaux de pluie, qui pourrait être la source d'eau du STEP. Ce projet pourrait également permettre au hameau de l'Aco de Caille de passer dans une

logique d'autoconsommation, en installant des panneaux photovoltaïques sur les toits des bâtiments. Le projet le plus à l'est quant à lui, repose sur la volonté des élus de réaliser un plan d'eau de loisir sur une parcelle communale, qui pourrait donc avoir un double usage. Bien que ce projet ait pour l'instant été abandonné, l'allier au projet de STEP pourrait permettre de le relancer.

Enfin, le projet au sud-ouest s'appuie sur la présence d'une station d'épuration à proximité du point bas, dont le fonctionnement nécessite probablement un réseau solide, que l'on pourrait utiliser pour injecter la puissance développée par la STEP dans le réseau, en plus d'avoir une potentielle source d'eau autre que le Rieu Tort proche du point bas.

Par ailleurs, les hameaux de Villaute, notamment le Spar qui a récemment demandé un renforcement du réseau à cause de la consommation de ses réfrigérateurs, ainsi que celui du Logis du Pin un peu plus loin, avec ses commerces, l'office du tourisme-gîte et le projet de maison de territoire, pourrait grandement bénéficier d'une telle installation. Il est toutefois important de remarquer que ces deux derniers projets présentent l'inconvénient d'être placés à l'ubac, il y a donc un risque de gel de l'eau en hiver si elle reste immobile. Le dernier endroit est intéressant pour son potentiel de source d'irrigation gravitaire des terres sur les piémonts. Ces quatre endroits ont donc une typologie différente mais ont tous un usage autre que le stockage d'énergie, qui participerait de la redynamisation du territoire.

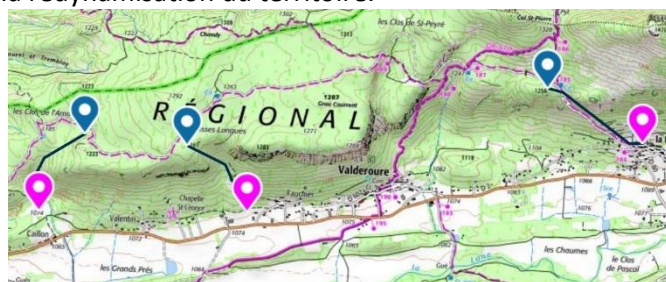


Figure 40 : Emplacements sélectionnés pour l'installation de STEP sur la commune de Valderoure

A Valderoure, les deux projets à l'ouest pourraient bénéficier de la future centrale photovoltaïque, qui serait la source de l'énergie que l'on stocke dans les STEP, ce qui serait tout à fait possible étant donné la puissance prévue de 10 MWc de la centrale et des dimensionnements prévus des STEP (cf. figure 44). De plus, ces STEP pourraient aussi irriguer les terres agricoles situées dans la vallée en

contrebas. Le projet à l'est étant à l'adret, on pourrait y installer une centrale photovoltaïque plus modeste, qui atteindrait 300 kW en équipant les bâtiments communaux et qui subviendrait aux besoins du hameau de la Ferrière, ou du moins une partie, et rechargerait la STEP pendant les périodes de faible demande. De plus, cette STEP pourrait s'incorporer avantageusement dans le paysage, en s'inscrivant dans la continuité de la zone urbanisée de la Ferrière, et en soulignant son organisation linéaire (cf. figures 41, 42 ,43).



Figure 41 : STEP projet de lac (Séranon)



Figure 42 : STEP de Lachens



Figure 43 : STEP de la Ferrière

Capacité des STEP

Projet de STEP	Energie nécessaire au fonctionnement (kWh)	Energie stockée (kWh)	Dénivelé (m)	Puissance photovoltaïque (kWc)
Séranon				
Blaquières-les Baux	971	640	192	600
Blaquières-Aco du Clos	906	597	225	
Projet de plan d'eau	453	299	101	
Lachens	561	370	126	
Oratoire	431	284	113	
Valderoure				
Falaises Longues	759	500	178	1000
Clos de l'Arrouse	595	392	110	
La Ferrière	626	412	112	

Figure 44 : Tableau récapitulatif des capacités des STEP

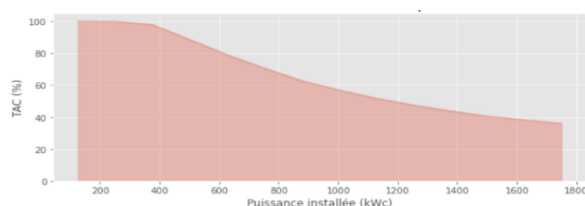


Figure 45 : Evolution du taux d'autoconsommation avec la puissance installée

On atteindrait alors une capacité de stockage totale de 4091 kWh, sur les deux communes (1304 kWh pour Valderoure et 2787 kWh pour Séranon). Connaissant les capacités de stockage des différents STEP, on peut dimensionner les installations photovoltaïques servant à les recharger, pour atteindre un objectif de taux d'autoconsommation que nous avons fixé à 80%. Pour cela, nous avons utilisé les données de consommation de Valderoure fournies par Enedis et exploitées par le groupe étudiant la ressource solaire pour construire une simulation de consommation confrontée à une simulation de production solaire, que l'on peut allier à un système de stockage générique, ici nos micro-STEP. Les données de Séranon n'ont pas été envoyées, mais les populations étant similaires, tant en termes de taille que d'activité, nous avons aussi utilisé cette simulation pour Séranon. Ainsi, sur Valderoure on atteint cet objectif pour environ 600 kWc installés, et il est satisfait pour 1 MWc à

Séranon. Reste alors à dimensionner les pompes pour encaisser les pics de surproduction, tout en conservant les gammes de puissance conseillées par Denis Blanquet (une soixantaine de kW par pompe maximum). A Séranon, absorber 90% de la surproduction en puissance est suffisant pour totalement mobiliser les capacités de stockage et de production en énergie. A l'inverse, à Valderoure, le nombre de projets de STEP permet d'encaisser la totalité de la surproduction en puissance, mais on est alors limités par la capacité de stockage en énergie des STEP (1300 kWh de stockage pour 1935 kWh de surproduction).

2.4.2/ Construction d'une STEP

Des micro-STEP de moindre ampleur

Les STEP à grande capacité de stockage sont des installations de grande ampleur, pouvant nécessiter des barrages et de grandes modifications du paysage. Nous avons voulu éviter ces cas de figure, par manque de place, de production de puissance photovoltaïque et pour que le projet vienne s'inscrire dans le paysage. Avec des micro-STEP de taille beaucoup plus modeste, il est en effet possible d'obtenir une synergie avec le paysage, via des bassins relativement petits, qui ne nécessitent pas plus de 1000 m³. Ceux-ci peuvent même être recouverts de bâches, qui permettent d'avoir des surfaces non nécessairement planes et de créer des réservoirs en longueur. De plus, les tranchées dans lesquelles passent les tuyaux ne requièrent pas de défrichement de la forêt, qui pourra même se reconstituer à l'endroit où les tuyaux seront mis.

Fonctionnement d'une STEP et perte d'énergie

Ce genre d'installation nécessite donc deux bassins situés à des hauteurs différentes, un alternateur-moteur, une pompe, une turbine (ou une turbine-pompe réversible) et des tuyaux de canalisations. Il s'agit d'un circuit fermé.

On peut définir le rendement global du cycle comme le rapport de l'énergie électrique consommée E_p par le pompage pour stocker l'énergie E et l'énergie électrique produite E_t en mode turbinage. Pour calculer ce rendement, on considère (Nikolou T. & al, 2020) :

- Des pertes de charges (frottements dans les conduits d'amenée d'eau aux turbines) dont la puissance correspondante est :

$$P = \rho g Q h_f$$

avec h_f la perte de charge hydraulique sur le circuit en m, qui peut être calculée à partir de l'équation de Darcy-Weisbach et qui est proportionnelle à la vitesse au carré.

- Les frottements et pertes d'énergie dans la ou les pompes : on prend en compte le rendement η_p (<1) de la machine de pompage

La puissance électrique qui doit donc être fournie est :

$$P_{pompe} = \rho g Q \frac{H_b + h_f}{\eta_p}$$

avec η_p le rendement de la pompe

tandis que la puissance récupérée par le turbinage est :

$$P_{turb} = \rho g Q (H_b - h'_f) \eta_t$$

avec η_t le rendement de la turbine et h'_f la perte de charge dans le circuit pendant le turbinage.

Ainsi, le rendement global du cycle vérifie (en considérant que toutes les caractéristiques hydrodynamiques comme le débit Q , rendements de la pompe et de la turbine sont constantes pendant chacune des deux phases) :

$$\eta = \frac{E_{turb}}{E_{pompe}} = \eta_p \eta_t \frac{H_b - h'_f}{H_b + h_f}$$

On remarque alors que $\eta < \eta_p \eta_t$ et que les pertes de charge hydrauliques peuvent être réduites en adoptant des conduites et galeries de grand diamètre, de telle sorte que la vitesse de l'eau ne soit pas trop grande.

Coût et profit

Nous avons aussi réfléchi à valoriser le transfert d'énergie entre heures pleines et heures creuses, afin de répondre aux attentes économiques des communes où les STEP seraient implantées. Ainsi, il serait intéressant de pomper l'eau pendant les heures creuses et de turbiner pendant les heures pleines. Dans un modèle simple où le prix du kWh en heures creuses C_c et le prix du kWh en heures pleines C_p sont constants, on définit un revenu dégagé :

$$R = C_p E_t - C_c E_p$$

Pour que R soit positif et puisque $E_t < E_p$ à cause des pertes, il faut que $\frac{C_c}{C_p} < \eta$ (Viollet, P.-L, 2014)

Le rendement d'une STEP est de l'ordre de 75-80%. Si on regarde les relevés d'EDF, on voit qu'en heures pleines, le prix du kWh est $C_p = 0.1798 \text{ € TTC}$, tandis qu'en heures creuses, on a $C_c = 0.1295 \text{ € TTC}$. On a alors $C_c/C_p = 0,72$. Il serait donc intéressant de mettre en place ce mode de pompage/turbinage.

Le coût d'une installation telle que nous l'envisageons sur les communes de Séranon et Valderoure est de l'ordre de 500 000€. 40% de ce budget sont dédiés au génie civil, 20% aux équipements électromécaniques (turbine, pompe...) et enfin 40% à l'installation de panneaux photovoltaïques. Cet investissement est en général amorti sur 30 ans sachant que la durée de vie d'une STEP est d'au moins 40 ans. La construction de ces installations peut aussi être une opportunité pour les entreprises locales.

Un frein au développement des STEP dans la région demeure : les possibilités de raccordement au réseau électrique. En effet la capacité d'accueil du réseau ENEDIS sur les

communes de Valderoure et Séranon est très limitée et l'installation d'une STEP nécessitera probablement un renforcement dont le coût est incertain. En effet, les endroits où la capacité d'accueil est supérieure à 30 kW sont relativement rares ce qui compromet l'installation de STEP.

3/ Valorisation de la dynamique du territoire

3.1 / Autre mode production d'énergie renouvelable : la méthanisation

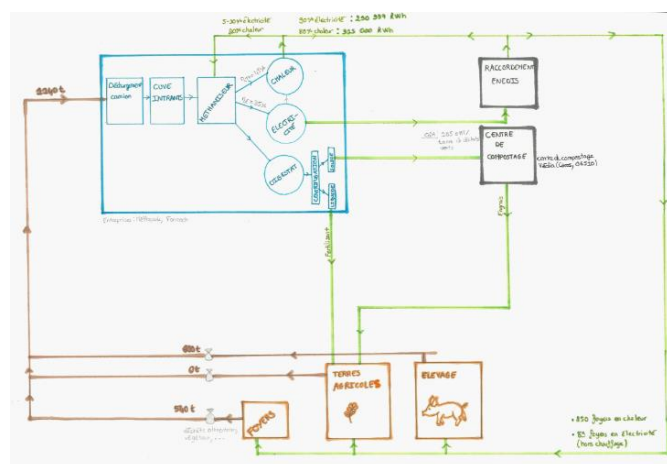


Figure 46 : Schéma de fonctionnement de la méthanisation

Nous avons imaginé un **projet de coopérative gérée par les agriculteurs du PNR et réunis autour du partage d'un méthaniseur** situé sur l'ancienne déchèterie. Comme nous pouvons le constater sur la figure 46 ci-contre, le méthaniseur représente une économie locale, où rien n'est gâché : les déchets agricoles (pailles, résidus de culture, ...), d'élevage (effluents animaliers, lisiers, ...) et même les déchets verts de foyers (alimentation, jardinage, ...) sont utilisés comme intrants.

Dans le méthaniseur, les intrants sont dégradés par digestion anaérobie (sans oxygène) de bactéries qui apparaissent naturellement à partir de la matière organique dans ces conditions. Ce procédé permet la production de biogaz constitué à environ 60 % de méthane et 40 % de dioxyde de carbone (Henry C., 2001).

Nous avons fait le choix d'utiliser un méthaniseur mésophile, c'est-à-dire faisant sa réaction à 20-35°C car il s'agit du plus répandu et qu'il offre un bon rendement (Vuillier & al, 2009) tout en consommant moins d'énergie que les méthaniseurs thermophiles (réaction à 75°). Le biogaz actionne ensuite un moteur à cogénération, permettant la production d'électricité (rendement moyen de 35 %) et de chaleur (rendement moyen de 45 %) (ADEME, 2016). 20 % de cette chaleur et 5 à 10% (Vuillier & al, 2009) de cette électricité permettent le fonctionnement du méthaniseur. Le reste de chaleur peut directement servir à chauffer des hangars agricoles/d'élevage, des foyers ... tandis que le reste de l'électricité peut être raccordé au réseau géré par Enedis.

Afin de quantifier la production énergétique de ce méthaniseur dans cette région nous avons envoyé :

- Un questionnaire aux soixante-dix-sept agriculteurs et éleveurs du parc avec un taux de réponse de 15 %. Il nous a permis d'identifier qu'en première approximation, seuls les éleveurs (27 dans le parc) sont intéressés par ce dispositif. Ils produisent en moyenne 15-20 tonnes de lisier par an. Avec un calcul optimiste, on obtient 600 tonnes de lisiers par an.
- Un second questionnaire envoyé cette fois aux habitants de Séranon et de Valderoure a permis d'établir que 60 % d'entre eux étaient intéressés par déposer gratuitement leurs déchets au méthaniseur. En France, en moyenne, près de 90 kg de déchets organiques par personne ne sont pas recyclés chaque année (Bilan du ministère de la transition écologique et solidaire, 2016). En considérant les 15 000 habitants dans le parc à un rayon de 30 minutes en voiture autour de la déchèterie et en supposant que seulement 40 % d'entre eux viendront effectivement y déposer leurs déchets verts, nous comptabilisons 540 tonnes de déchets organiques.

Grâce à un simulateur créé par l'entreprise GRDF ([Simulateur](#)), nous déterminons la production énergétique de biométhane obtenue chaque année à partir de ces intrants. Ensuite, en considérant

le moteur à cogénération et l'utilisation directe par le méthaniseur, nous produisons : 290 937 kWh/an d'énergie électrique et 315 000 kWh/an d'énergie thermique. D'après l'entreprise RTE (RTE, 2016), les foyers français consomment en moyenne 4500 kWh d'énergie par an dont 28 % pour le chauffage. Nous aboutissons à la conclusion qu'avec cette production par le méthaniseur, nous pouvons chauffer 250 foyers en moyenne et répondre à la consommation électrique de 89 foyers (hors chauffage).

Le méthaniseur demandant des travaux coûteux pour son installation (de l'ordre du million d'euros pour l'étude, la construction, l'entretien, ...), nous concluons que ce projet ne peut être réalisé en l'état car la quantité d'intrants, même en étant calculée de façon optimiste, ne permet pas une production d'énergie suffisante pour espérer un retour sur investissement sur une durée modérée. Ce type d'installation présente néanmoins des avantages environnementaux non négligeables : le traitement des déchets représente une source d'énergie pouvant être utilisée localement et permet la production de fertilisant et d'engrais et le fait d'être non intermittent, contrairement au solaire, garantit une production et une redistribution constantes. Par ailleurs, une analyse de cycle de vie publiée par l'ADEME en 2011 révèle qu'un méthaniseur permet une réduction de 50% à 70% des émissions de gaz à effet de serre en comparaison avec le chauffage au gaz naturel ou au diesel (cf. figure 47). Nous pensons que dans une stratégie de développement du dynamisme de la commune, ce projet pourrait apparaître si le nombre d'éleveurs, de résidents et le budget augmentent sur le territoire.

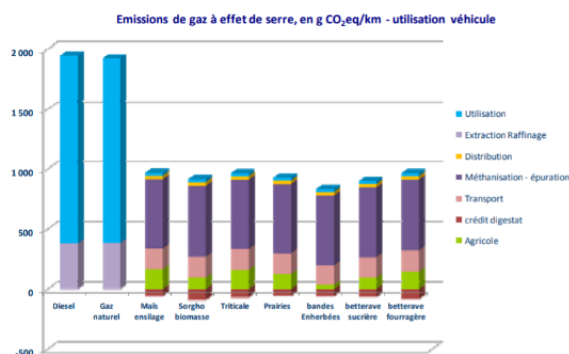


Figure 47 : Emissions de gaz à effet de serre – utilisation véhicule (ADEME, 2011)

Bilan

Nous avons développé une stratégie unique pour redynamiser ce territoire, dans un souci de transition écologique. Les projets, bien qu'ayant été développés indépendamment par les membres de l'équipe solaire, s'articulent intelligemment dans le temps et dans l'espace à l'échelle du PNR des Préalpes d'Azur : les retours sur investissement de l'un permettent le lancement de l'autre, l'emplacement d'un projet devient la vitrine d'un second, ...

Géographiquement, ils s'articulent dans une cohérence globale autour des principaux axes du territoire d'étude (axes Est-Ouest : route Napoléon, ligne haute tension...), permettant un accès facile et des interactions privilégiées entre les différents projets. La carte de paysage (figure 1) présentée dans la partie stratégie montre bien l'harmonie d'un projet ancré dans le paysage et s'appuyant sur celui-ci pour redynamiser le territoire dans sa globalité.

Nous avons l'habitude au cours de nos études de répondre à des questions à l'aide de méthodes reproductibles. Ici, il n'en est rien : les attentes, les ressources mais aussi les craintes des parties prenantes et de l'espace disponible ont été attentivement écoutées et prises en compte. Leur multitude fait de cet "énoncé" un système bien plus complexe que ce que nous avons l'habitude de traiter. C'est cette complexité qui fait que la stratégie développée ne peut être qu'unique.

Ce MIG a plus que jamais été l'occasion de se mettre dans la peau d'un ingénieur. Sachant que les projets n'ont en aucun cas été imposés par nos encadrants, il nous a permis de développer notre autonomie. La rencontre avec des intervenants au profil varié (paysagistes, ingénieurs électriques, agriculteurs, politiciens, ...) nous a appris à ne pas appliquer des projets scientifiques pour la science pure mais pour l'intérêt sociétal qu'ils apportent sur leur territoire d'implantation. C'est probablement l'apprentissage qui nous marquera le plus dans nos futures carrières.

Bibliographie

ADEME, "Analyse de cycle de vie du biogaz issu de cultures énergétiques" (2011)

<https://www.ademe.fr/analyse-cycle-vie-acv-biogaz-issu-cultures-energetiques>

ADEME, "Chaleur issue de la méthanisation, de réelles opportunités" (2016). Guide pratique.

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/8840_chaleur_issue_de_la_methanisation.pdf

Bonnier Jean, "A la rencontre des forêts méditerranéennes, Quarante années de témoignage" (2020)

B.Y.H. Liu, R.C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation, Solar Energy, 4 (3) (1960), pp. 1-19

e.LIOS, Enedis (2020), première consultation le 23/11/2020.

<http://elios.web-enedis.fr/>

Henry C., "What is an anaerobic digester" (2001). Manure Matters (newsletter). Vol. 7, n° 10.

<https://digitalcommons.unl.edu/manurematters/10>

Ministère de la transition écologique et solidaire, "Bilan 2016 de la production de déchets en France" (2019).

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-12/datalab-essentiel-198-bilan-2016-production-dechets-france-decembre2019.pdf>

Nikolou T. & al, "Modeling and optimal dimensioning of a pumped hydro energy storage system for the exploitation of the rejected wind energy in the non-interconnected electrical power system of the Crete island, Greece" (2020), MDPI.

<https://doi.org/10.3390/en13112705>.

Région Sud Provence Alpes Côte d'azur, "structurer et valoriser la filière plantes à parfum, aromatiques et médicinales" (2019).

<https://www.maregionsud.fr/aides-et-appels-a-projets/detail/structurer-et-valoriser-la-filiere-plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales>

Remilieux Hubert et al, "Etude de faisabilité économique du projet d'autoconsommation collective de Saint-Julien-en-Quin", 2019

RTE, "Bilan électrique 2015" (2016).

http://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2015_bilan_electrique.pdf

SoDa Web Service

<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-pay>

Vennetier Michel, "Les effets du changement climatique sur la forêt : Forêts et changement climatique, le constat en région méditerranéenne" (2015)

<http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles/pdf/set-revue-foret-mediterranee-changement-climat.pdf>

Vernet Jean-Louis, "L'homme et la forêt méditerranéenne de la préhistoire à nos jours" (1997)

Viollet, P.-L. "Stockage d'énergie par pompage hydraulique : STEP. *Techniques de l'Ingénieur, Énergies* | Ressources énergétiques et stockage" (2014).

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/stockage-de-l-energie-42638210/stockage-d-energie-par-pompage-hydraulique-step-be8582/>

Vuillier G. & al, "La filière biomasse : état des lieux et valorisation énergétique" (2009). Rapport du laboratoire de recherche en énergie éolienne.