

Transition énergétique du domaine du Rayol

Vers une efficacité, autosuffisance et exemplarité énergétique du jardin des Méditerranées



Pièce centrale de l'héritage de Gilles Clément, le jardin du Rayol se veut être un lieu d'expérimentation. D'abord expérimentateur dans la représentation de notre rapport au monde du vivant, dans une atmosphère de compréhension, de respect et de durabilité. Maintenant dans la genèse d'une gestion durable et exemplaire des ressources énergétiques.

Entre terre et mer, au milieu du climat méditerranéen, ce domaine est une synthèse de végétation planétaire, et d'énergies possiblement exploitables tout en restant dans la lignée initiale du domaine.



Ce rapport résume le travail réalisé par 17 élèves-ingénieurs en première année du cycle ingénieur de l'école des Mines de Paris, encadrés par Philippe BLANC, Joris MASAFONT et Romain BESSEAU, en vue d'assurer la transition énergétique du jardin planétaire qu'est le domaine du Rayol.

Table des matières

I	Le chemin du visiteur dans le nouveau Rayol : un esprit à conserver	3
I-A	Contexte	3
I-B	Association et ancrage dans la commune	3
I-C	Explication de notre démarche	4
II	Consommation énergétique actuelle du domaine	6
II-A	Variations mensuelles de la demande électrique	6
II-A1	Étude brute de la demande énergétique mensuelle	6
II-A2	La consommation du domaine l'hiver	6
II-B	Étude des consommations dans l'éventualité d'une rénovation thermique de l'hôtel de la mer	7
II-B1	La part du chauffage dans la consommation totale du domaine	7
II-B2	Calcul de l'économie d'énergie réalisée par changement d'un simple pour un double vitrage	7
II-B3	Puissance thermique maximale à fournir pour le chauffage	8
II-B4	Synthèse de ces calculs	9
II-B5	Des méthodes pour le chauffage de l'Hôtel de la mer	9
III	Installations pour la production d'énergie au cœur du domaine	11
III-A	Des installations photovoltaïques pour répondre à une grande partie de la demande en énergie	11
III-A1	Étude du potentiel photovoltaïque des sites, présentation de nos trois types d'installation initiaux	11
III-A2	Finalement, 6 sites d'installation solaires retenus	12
III-A3	Intégration des installations au paysage	14
III-A4	Analyse de cycle de vie des panneaux solaires	14
III-B	Le vent, élément qui ne semble pas exploitable	14
IV	Gestion du stockage et du réseau électrique	16
IV-A	Variations journalières de la demande électrique	16
IV-A1	Des variations importantes en demande de puissance	16
IV-A2	De l'électricité demandée la nuit	16
IV-A3	Une nécessité : stocker l'énergie	17
IV-A4	Les diverses possibilités techniques pour assurer un stockage suffisant	17
IV-B	Le réseau électrique	17
IV-B1	Gérer le problème des surtensions - transformateur d'isolement	17
IV-B2	Retrouver le réseau existant ou en refaire un ?	18
IV-B3	Îlotage du domaine et indépendance énergétique ?	19
V	Gestion de la ressource en eau	20
V-A	Réseaux d'irrigation	20
V-A1	Nécessité du stockage de l'eau	20
V-A2	Étude hydrogéologique des sources d'eau du domaine	21
V-A3	Identification et caractérisation des ressources en eau par récupération d'eau de pluie	23
V-B	Un circuit qui se ferme : épuration des eaux usées par lagunage naturel	24
V-B1	Le système retenu, et description de son intégration dans le jardin	24
V-B2	Rôle, dimensions et population végétale des bassins	25
V-B3	Dimensions des bassins	26
V-B4	Solutions à quelques problèmes potentiels	26
V-C	Un réseau d'eau en lien avec les énergies : la technologie de μ -STEP	28
V-C1	Fonctionnement de la μ -STEP	28
V-C2	La tour pomme de pin	31
V-D	Aspect général du système de gestion des eaux retenu	31
VI	Une vue globale sur les installations proposées	33
VI-A	Évaluation des installations proposées	33
VI-B	Une solution qui se veut pédagogique	35
VII	Conclusion	37

I) Le chemin du visiteur dans le nouveau Rayol : un esprit à conserver

I-A) Contexte

Le domaine du Rayol est un site ancré dans l'histoire et nous avons cherché à exploiter son héritage. Acheté en 1910 par Alfred Courmes, il y fait construire la ferme et sa demeure principale, qui deviendra l'Hôtel de la mer, puis la villa du Rayolet. En 1940, le domaine devient la propriété de la famille Potez. Après la guerre, les bâtiments sont remis à neuf et de nombreux jardiniers prennent en main le jardin. Mais à la fin des années 60, le jardin est délaissé. Le domaine échappe ensuite à de nombreux projets immobiliers grâce à la mobilisation des défenseurs de l'environnement. Il est acheté en 1989 par le Conservatoire du littoral, qui fait appel au paysagiste Gilles Clément pour imaginer le nouveau jardin des Méditerranées, constitué de plusieurs jardins qui traduisent les ambiances végétales de différentes contrées du monde, reliées par le climat méditerranéen. Le domaine a donc un fort héritage, que nous avons cherché à prendre en compte dans notre projet.



FIGURE 1 – Une vue depuis la pointe du Figuier (Jean-Alfredo Albert)

I-B) Association et ancrage dans la commune

Le domaine du Rayol est désormais sous la gestion d'une association, qui fait partie intégrante de l'histoire du jardin et se veut un acteur fondamental dans son évolution au cours du temps. L'acquisition du domaine du Rayol par le Conservatoire du littoral fut un tournant majeur de cette histoire particulière, qui a donné suite à la création de l'association. À but non lucratif et créée avec le soutien des collectivités locales, sa collaboration étroite avec le Conservatoire du littoral s'est attachée à la concrétisation du projet de jardin des Méditerranées en accord avec la pensée de Gilles Clément. Lui donner du sens, éclairer pour mettre au jour une meilleure compréhension des paysages naturels et des phénomènes vitaux qui y prennent place : telle est sa mission.

Depuis trois décennies désormais, l'association œuvre à faire rayonner le domaine sur tous ses aspects et de tous côtés. Son activité s'inscrit dans un travail de longue durée lui permettant aujourd'hui de s'autofinancer à 90%. Le domaine du Rayol reste avant tout une parcelle de 20 hectares (dont 6 hectares pour le jardin) au sein de la commune française de Rayol-Canadel-sur-Mer qui a hérité du climat méditerranéen. Le jardin revêt aujourd'hui une signification singulière, car il se veut à la fois une vitrine exemplaire en termes des milieux naturels et de la biodiversité, et aussi un lieu d'éducation ouvert au grand public. En soulignant la responsabilité de l'homme dans la gestion de la nature, il a reçu du Ministère de la Culture le label de "Jardin remarquable"¹.

Sur le long terme, la vision d'avenir de l'association est celle qui vise à développer les infrastructures du domaine, augmenter le taux d'autofinancement, intégrer les sciences à la structure du jardin, adopter une gestion économe et autonome des ressources du jardin, et apporter une portée didactique au parcours du visiteur.

I-C) Explication de notre démarche

Au cours de la première semaine, nous sommes allés au domaine du Rayol où nous avons rencontré les acteurs présents sur place : les jardiniers, les membres de l'association gérante du domaine ainsi que de nombreux intervenants, venus pour nous apporter des informations utiles pour notre projet.

D'abord, à notre arrivée sur le domaine, nous avons pu avoir une première impression du jardin grâce à une visite organisée par Gilles Clément : nous avons pris conscience de la beauté du site, de son unicité. Nous avons pu explorer le jardin, faire l'expérience du voyage auquel ce jardin des Méditerranées nous invite à travers les multiples paysages du climat méditerranéen. Lors de la présentation par Gilles Clément, nous avons pu identifier les concepts majeurs de ce jardin :

- Un **jardin en mouvement**, dont la visée est, comme le soutient Gilles Clément, de restreindre les contraintes et frontières que l'homme a tendance à imposer au milieu et aux végétaux, avec sa devise "faire le plus possible avec, le moins possible contre". Il ne faut pas agir sur l'environnement au point d'en perturber l'équilibre et il faut accompagner cet équilibre naturel au sein d'un jardin qui évolue dans l'espace et le temps, dans une attitude de sobriété énergétique et de responsabilité écologique
- Un **jardin planétaire** au sein duquel tout vole, tout se déplace en permanence, avec l'idée de brassage planétaire, ce mécanisme d'évolution des zones climatiques et de compatibilité de vie
- Un **jardin d'expérimentation**, qui ne cesse d'évoluer : la recherche domine toujours l'aménagement, la pédagogie prend le pas sur l'ornement... Le domaine est en effet un lieu d'expérimentation avec le vivant, c'est de là que provient la possibilité que nous avons d'expérimenter un environnement du futur avec les énergies renouvelables.

Ensuite, un grand apport de connaissances sur le domaine, sur les concepts auxquels les parties prenantes sont attachées et sur le mouvement de transition énergétique qui s'amorce a posé la base de notre réflexion. Au cours de la première semaine, notre début de projet a été nourri par de nombreuses visites et conférences.

La botaniste Véronique Mure nous a proposé une visite du jardin pour mieux comprendre le cycle de vie des plantes et leur évolution. Le Conservatoire du littoral et la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) nous ont présenté les réglementations en vigueur sur le domaine. Nous avons également assisté à l'intervention de plusieurs artistes : Bernard Dejonghe, Nathanaël Abeille, Etienne Rey et Olivier Nattes, venus pour nous sensibiliser et nous parler de leurs œuvres d'art, dans une optique d'intégrer la dimension artistique à notre projet. Nous avons enfin eu des apports de connaissances scientifiques et techniques au service de notre projet : Philippe Blanc nous a fait une conférence à propos de la ressource solaire qui nous a offert un panorama sur les diverses possibilités de son exploitation, notamment à appliquer au domaine du Rayol. Sebastien Morilhat, Denis Blanquet, Hubert Rémileux, Enerlice, Romain Besseau sont venus nous faire des présentations sur l'ingénierie au service de notre projet. Enfin, Nathalie Pitaval nous a formé au Lean Management afin de permettre notre organisation pour optimiser le travail en équipe lors des semaines suivantes.

En outre, nous avons eu la possibilité de collaborer avec des paysagistes, afin de ne pas oublier l'importance des lignes de paysages dans l'aménagement du jardin. Cet apport de la part des paysagistes, ainsi qu'une visité de l'île de Porquerolles, n'ont pas manqué de nous inspirer.

1. Lien pour le site du ministère : <https://www.culture.gouv.fr/Aides-demarches/Protections-labels-et-appellations/Composants-Labels/JR/Carte-des-jardins-remarquables#/pinpoints/32139760>

Parcourant le domaine et venant à la rencontre de ses différents acteurs, nous avons essayé de comprendre la demande qui nous était faite et d'analyser les ressources disponibles sur ce domaine afin de dégager des pistes potentielles d'amélioration.

On a donc fait émerger une commande, défini le cahier des charges et les lignes directrices en analysant tous les points de vue qui nous ont été présentés et en cherchant à prendre en compte tous les acteurs :

- Les **jardiniers**, sur le terrain, nous ont notamment exprimé leur souhait de tendre vers une autonomie hydraulique : ils trouvent en effet absurde de devoir partiellement arroser les plantes avec de l'eau de ville alors-même que les ressources en eau du domaine ne sont pas entièrement exploitées
- L'ensemble des membres de **l'association** nous a fait part de leur volonté d'autonomie du domaine, dans une optique d'exemplarité énergétique
- Il a également fallu prendre en compte l'aspect réglementaire imposé par **les services de l'État**
- Enfin, l'avis des **visiteurs**, pour lesquels la préservation de la biodiversité et le côté peu anthropisé du domaine sont des atouts majeurs.

Il a donc fallu concilier différentes sensibilités pour faire émerger la commande que nous devons satisfaire. Les lignes directrices que nous avons établies sont les suivantes :

- Préservation et accompagnement :
 - Préserver la biodiversité ("jardin planétaire")
 - Préserver la beauté du site
 - Préserver le côté naturel du site, le côté peu anthropisé
 - Accompagner l'équilibre du jardin face aux aléas du changement climatique
- Poursuivre l'exemplarité :
 - Devenir un exemple de transition énergétique, écologique
 - Inspirer et éduquer les visiteurs
 - Projet créé sur-mesure pour le domaine du Rayol s'inscrivant dans le cadre du jardin d'expérimentation
- Évolution et innovation :
 - Idée d'un jardin en constante évolution dans l'espace et dans le temps
 - Accompagner les dynamiques du site par les énergies renouvelables (multi usage)

On a observé différents potentiels sur le domaine, ce qui nous a conduit à explorer plusieurs pistes techniques, tout en prenant en compte l'aspect esthétique et l'intégration dans le paysage (collaboration avec les paysagistes).

Nous avons cherché à raconter un histoire qui intègre chacune de nos pistes de réflexion dans le jardin, notamment en étudiant la notion de fabrique de jardin : petite construction qui met en valeur un élément ou une ressource du jardin... L'ensemble des pistes explorées seront remises sous forme de **fiches actions**, que l'on distribuera à l'association avec les informations importantes, pour permettre une bonne appropriation des solutions. Il y a deux types de fiche action : certaines développent un aspect technique avec des questions de prix, de rentabilité, d'impact carbone, alors que d'autres développent un aspect plus artistique.

II) Consommation énergétique actuelle du domaine

II-A) Variations mensuelles de la demande électrique

II-A1) Étude brute de la demande énergétique mensuelle

Le domaine est actuellement connecté au réseau Enedis pour subvenir à ses demandes électriques mensuelles. On peut donc obtenir l'évolution mensuelle de sa consommation énergétique :

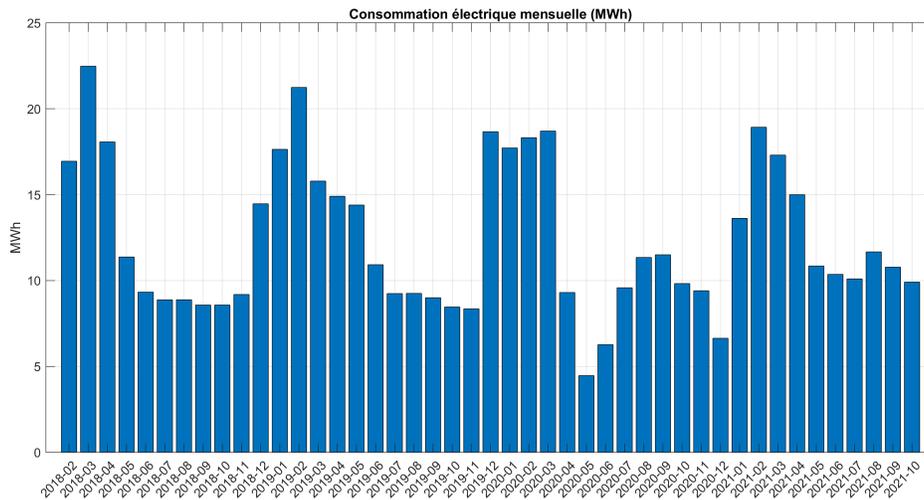


FIGURE 2 – Évolution de la consommation mensuelle facturée en kWh

Notons aussi que la demande du jardin se concentre essentiellement au niveau de l'Hôtel de la mer et du restaurant. On constate une demande deux fois supérieure en hiver par rapport à l'été, due à un chauffage plus important en hiver : cette affirmation est étudiée plus en détail dans la partie suivante.

II-A2) La consommation du domaine l'hiver

On justifie dans la suite que la puissance électrique demandée (hors chauffage) est stable toute l'année (elle correspond environ à celle demandée l'été). Pour cela on représente un profil de consommation électrique en fonction de la température :

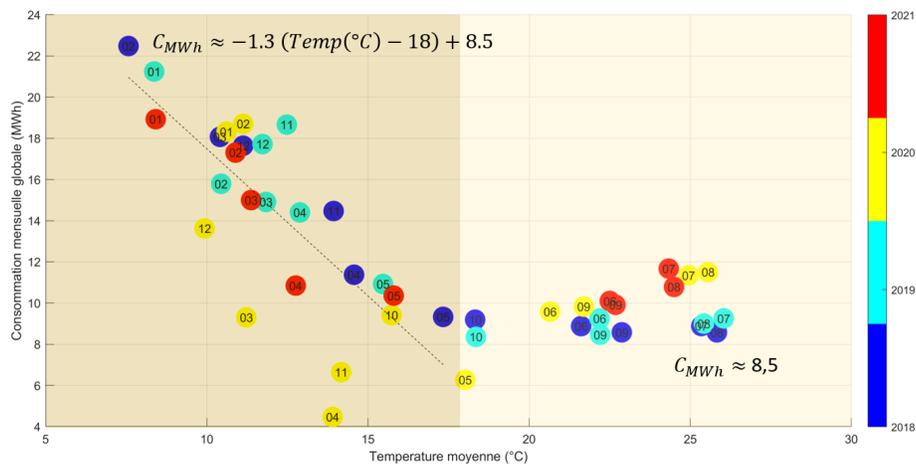


FIGURE 3 – Consommation électrique mensuelle et température : deux paramètres liés

Sur ce graphe chaque pastille représente un mois. Les couleurs des pastilles représentent les années, et les numéros à l'intérieur représentent le numéro du mois de l'année.

On remarque une corrélation entre température et consommation d'énergie dans le domaine, mais qui n'est pas tout à fait parfaite. En effet, sur la figure 3, l'année 2020 n'a pas le même profil que les années 2018 et 2019. En regardant plus précisément le graphe ci-dessus, on constate que 4 points s'éloignent largement des autres : mars, avril, novembre et décembre 2020. Ces mois sont ceux des deux confinements que nous avons subi au cours de l'année 2020. La consommation d'électricité durant ces périodes n'est pas représentative des autres années, du fait de la fermeture exceptionnelle du domaine. En retraçant ce graphe pour les points précédant 2020, on obtient le graphe suivant :

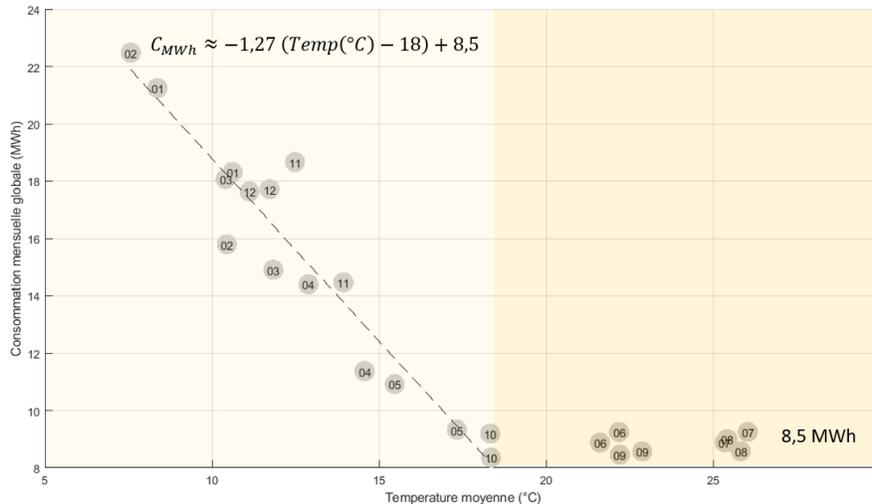


FIGURE 4 – Évolution de la consommation mensuelle facturée en kWh

On constate ici une bien meilleure corrélation entre température et consommation. L'été, quand la température dépasse 18°C, la consommation mensuelle est relativement constante. On peut donc considérer que la climatisation dans la cuisine consomme la même énergie tout au long de l'année. Par extension, la consommation de la cuisine est la même toute l'année, car elle varie peu en fonction du nombre de couverts servis (la variation de consommation d'énergie par le four en fonction du nombre de plats est faible devant l'utilisation des frigos toujours constante). Au contraire, en-dessous de 18°C, la consommation augmente linéairement en fonction de la température. On peut considérer que l'augmentation de la consommation d'énergie l'hiver est uniquement due au chauffage, et représente l'entièreté du chauffage.

Avant de voir comment répondre à la demande énergétique que nous venons de présenter, il semble donc pertinent de faire un détour par l'étude de l'isolation thermique des bâtiments et de potentielles méthodes de chauffage plus efficaces pour prédire une éventuelle baisse de consommation, qui modifierait sensiblement la demande énergétique du domaine et donc le dimensionnement de nos installations.

II-B) Étude des consommations dans l'éventualité d'une rénovation thermique de l'hôtel de la mer

II-B1) La part du chauffage dans la consommation totale du domaine

On peut donc approximer ceci : en 2019, le chauffage compte pour environ 47 MWh.an⁻¹. La consommation totale en électricité étant de 157 MWh.an⁻¹, le chauffage représente donc environ 30% de la consommation d'électricité. On constate un pourcentage diminué en 2020, qui correspond à l'impact des confinements ayant eu lieu en mars et décembre, mois froids où le chauffage est fortement utilisé. Cette année est peu représentative.

Ces variations sont problématiques dans le sens où dans le cas d'un domaine auto-suffisant grâce à l'énergie solaire, la ressource solaire sera moindre en hiver. On se concentre donc particulièrement sur le chauffage au niveau de l'Hôtel de la mer pour comprendre plus précisément ces variations de consommation globale, et pour saisir la façon dont il serait possible de lisser le profil précédent, voire le faire se rapprocher du profil de variation de radiation solaire au cours de l'année. Ces projections sont essentielles pour mieux appréhender les solutions techniques adéquates.

II-B2) Calcul de l'économie d'énergie réalisée par changement d'un simple pour un double vitrage

Par dimensionnement de la structure de l'Hôtel de la mer (nature, épaisseur, largeur et longueur des murs et fenêtres), on peut approximativement déterminer la puissance thermique à fournir par salle en fonction de la température extérieure.

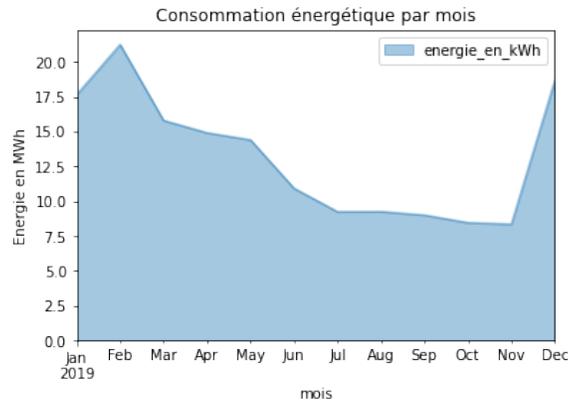


FIGURE 5 – Évolution de la consommation mensuelle en 2019

Cela permet ainsi de calculer l'économie réalisée par passage d'un vitrage d'un coefficient de transfert thermique λ_1 à λ_2 pour le vitrage, une surface de vitrage S , et un profil $T(t)$ de température discrétisé avec un pas d'une heure :

$$E_{\text{thermique économisée par jour}} = \sum_{h=1}^{24} \Delta T(h) \cdot t_{1h} \cdot (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot S$$

Cette formule a été construite à l'aide de celles des cours de thermodynamique de classe préparatoire. Pour $\lambda_1 = 2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda_2 = 6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, et après calcul de S par mesure dans l'Hôtel de la mer, et approximation des profils journaliers de température extérieure et intérieure en fonction des différents mois, on obtient le graphe suivant.

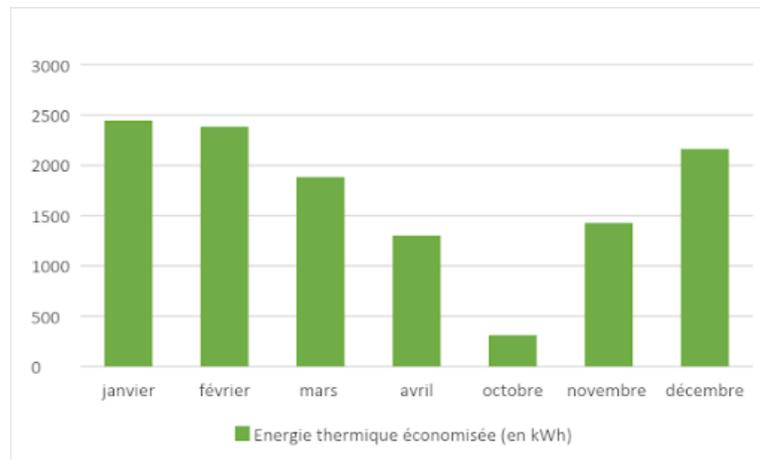


FIGURE 6 – Économies mensuelles d'énergie thermique résultantes d'un changement d'un simple pour un double vitrage dans l'Hôtel de la mer.

On pourra retenir, en première approximation, qu'on consommerait 12 MWh de moins par an pour le chauffage avec un tel changement de vitrage.

II-B3) Puissance thermique maximale à fournir pour le chauffage

On détaille en annexe page 38 la méthode utilisée pour calculer la puissance thermique nominale que doit pouvoir fournir notre système de chauffage. Avec celle-ci, on calcule les déperditions thermiques de chaque pièce du bâtiment, c'est-à-dire qu'on calcule la puissance thermique à fournir pour maintenir une température constante dans l'Hôtel de la mer quand la température extérieure atteint sa valeur minimale dans l'année. On regroupe les résultats de déperdition thermique (égale à la puissance thermique à fournir) dans le cas de différents vitrages (leurs caractéristiques sont détaillées dans l'annexe page 38) : les déperditions totales ci-dessous et le détail par salle de l'Hôtel de la mer (dans le cas d'un simple vitrage) se trouvent à la fin de ce rapport.

Étage	Déperditions simple vitrage (kW)	Déperditions double vitrage (kW)
rdc	14.2	12.4
1	14.3	11.8
2	14.1	12.9
Total	42.6	37.2

TABLE I – Récapitulatif des ordres de grandeurs utilisés.

Dans le cas d'un double vitrage, on passerait donc d'une puissance thermique maximale nécessaire de 37,2 kW pour l'Hôtel de la mer contre 42,6 kW dans le cas actuel. Cela sera à prendre en compte dans l'étude du système de chauffage à installer et l'étude du stockage d'énergie à venir.

II-B4) *Synthèse de ces calculs*

Les calculs précédents permettent ainsi de prévoir une diminution de consommation par chauffage d'environ 11 MWh par mois, soit 7% de la consommation totale du domaine. Malgré tout, faire en sorte que le chauffage soit indépendant de l'électricité est très important : on le consomme en hiver, au moment où la production solaire est la plus faible. Sans ce dispositif, il faudrait un stockage très important qui ne servirait que durant les mois les plus froids.

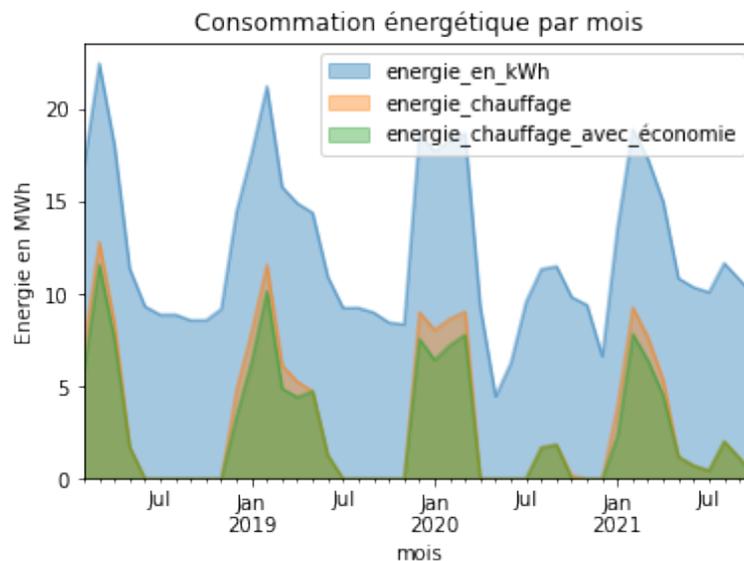


FIGURE 7 – Part du chauffage de l'Hôtel de la mer dans le bilan énergétique mensuel du domaine, dans les deux scénarios de vitrage

II-B5) *Des méthodes pour le chauffage de l'Hôtel de la mer*

Pour satisfaire la demande, nous avons retenu deux méthodes de chauffage parmi celles possibles : chauffage par chaudière à bois à l'aide des ressources du domaine, ou par pompe à chaleur aérothermique, dans les deux cas avec réseau d'eau. Les caractéristiques de ces deux méthodes sont regroupées en annexe page 39, avec la justification de leur viabilité dans le cas du domaine du Rayol. On détaille aussi dans cette annexe les méthodes exclues, ainsi que les raisons de leurs exclusions.

Les calculs de dimensionnement du chauffage permettent alors de prévoir les coûts et les impacts environnementaux des deux solutions retenues en cas d'installations. Retenons juste qu'en 2019, le chauffage coûte environ 6 200 €. On peut alors calculer la **durée d'amortissement** des deux solutions après prévision de leurs coûts, ainsi que la durée nécessaire pour que le système compense son **empreinte carbone**. Le détail des calculs est donné en annexe, et on retiendra les valeurs ci-dessous :

- *Chaudière à bois* : amortissement financier en 10 ans. Le système compense l'empreinte carbone de sa fabrication en 23 ans.
- *PAC air-eau* : amortissement financier en plus de 40 ans. Le système compense l'empreinte carbone de sa fabrication en 34 ans.

L'aspect intéressant de chacune de ces méthodes est donné pour la chaudière à bois par l'utilisation des ressources sur place, et pour la pompe à chaleur par l'augmentation de l'efficacité du chauffage. Ces deux types de chauffage permettent d'aplanir la courbe bleue précédente, qui s'approche alors de la courbe de production d'une éventuelle production d'électricité photovoltaïque. On notera que c'est le chauffage à bois qui permet le meilleur aplanissement de cette courbe, étant donné qu'il ne consomme pas d'électricité, alors qu'une PAC ne permet que de diviser la consommation électrique par 3.

Nous avons donc maintenant en tête un ordre de grandeur de la consommation énergétique du domaine pour les deux scénarios : rénovation thermique ou l'hôtel de la mer ou un bâtiment laissé tel quel. Nous pouvons ainsi nous focaliser sur l'intégration d'installation dans le domaine qui pourrons nous conduire en partie à l'autosuffisance énergétique désirée.

III) Installations pour la production d'énergie au cœur du domaine

III-A) Des installations photovoltaïques pour répondre à une grande partie de la demande en énergie

III-A1) Étude du potentiel photovoltaïque des sites, présentation de nos trois types d'installation initiaux

Nous avons pu effectuer des mesures de rayonnement solaire en différents points du domaine, à l'aide d'un luxmètre. Les valeurs relevées, variant entre 400 W.m^{-2} et 1100 W.m^{-2} , nous ont avant tout permis d'évaluer le potentiel des différents sites pour l'accueil de panneaux solaires. Au cours des mesures, certaines spécificités sont apparues : toits ensoleillés, larges surfaces, zones moins valorisées,... Ainsi, ces mesures (plus qualitatives que quantitatives) ont permis d'écarter certaines possibilités, comme la pergola du jardin, ou la Pointe du Figuier. Des sites ont également été rapidement écartés du fait des difficultés techniques ou réglementaires (par exemple les falaises, le Rayolet ou le parking au nord du verger).

À partir des données de rayonnement solaire issues du satellite Meteosat utilisant le service CAMS Radiation : *site de Meteosat*, et l'algorithme Heliosat-4 développée par le centre OIE de MINES Paris, nous avons pu étudier plus en détail le potentiel des différents sites.

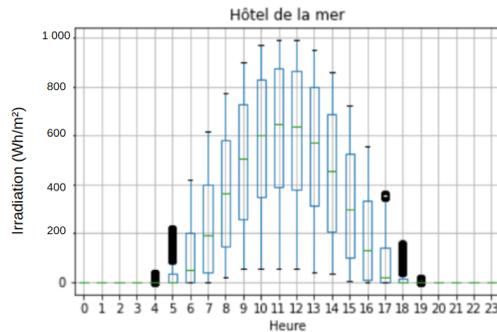


FIGURE 8 – Variabilités intra-journalières de l'irradiation sur l'Hôtel de la Mer

Les données ont permis d'obtenir l'irradiation annuelle de différents sites, pour évaluer leur potentiel à accueillir des panneaux photovoltaïques.

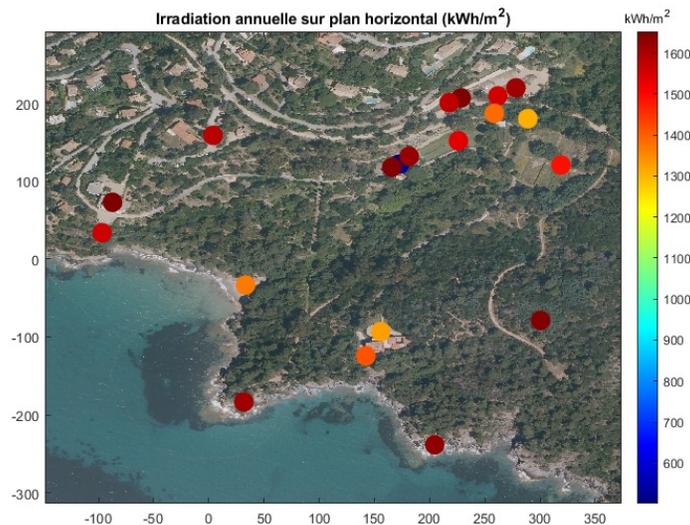


FIGURE 9 – Potentiel photovoltaïque des différentes sites

Différents types d'implantation de panneaux solaires ont alors pu être éprouvés à l'aide des données.

- Type 1 - bâtiments : Hôtel de la mer (400 m²), arrière du café des jardiniers (120 m²), maison au nord du verger (90 m²), maison de la plage (70 m²)
- Type 2 - parkings : Parking de l'hôtel (250 m²) et potentielle pergola sur l'aire naturelle de stationnement (300 m²)
- Type 3 - zones diverses : Maquis au sud de l'hôtel (850 m²), aire de compostage (80 m²) et route DFCI (2500 m²)

Les sites présentés dans ces types n'ont pas vocation à être entièrement recouverts de panneaux solaires. En recouvrant une portion des sites, il a été possible d'établir pour les différents site des profils de l'énergie reçue en moyenne, annuellement, ou quotidiennement. Par exemple, on a obtenu les profils type pour une journée d'été, d'hiver, d'octobre ou d'avril.

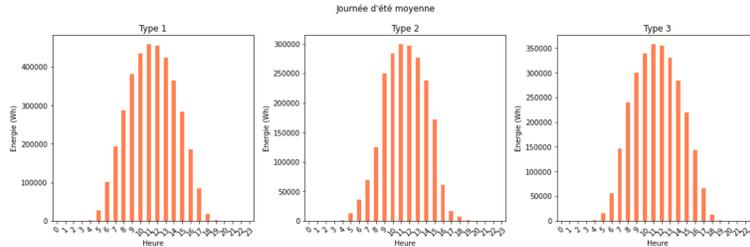


FIGURE 10 – Journée type selon le type d'implantation en été

À première vue, et en considérant seulement l'énergie solaire, le type 1 (les bâtiments) semble le plus rentable. Pour ce type d'installation, on obtient en moyenne $E_{th} = 831$ MWh d'énergie rayonnée incidente au sol reçue annuellement, et on calcule l'énergie électrique correspondante :

$$E = E_{th} \times \eta_{PV} \times PR$$

avec η_{PV} le rendement de l'ordre de 0,2 et PR un taux de performance pris égal à 0,8.

On obtient finalement une énergie électrique photovoltaïque $E = 133$ MWh, à comparer à la consommation électrique annuelle du domaine, de l'ordre de 150 MWh. Ainsi, des panneaux sur les bâtiments pourraient grandement contribuer à l'autonomie du domaine.

III-A2) *Finally, 6 solar installation sites retained*

Après avoir réalisé cette étude, seuls certains sites propices à l'installation de panneaux ont été conservés. Les calculs de la partie précédente ont permis d'éliminer des zones trop peu exposées, comme la maison de la plage. Le côté esthétique et naturel du domaine nous a amené à privilégier l'utilisation des zones déjà anthropisées, telles que les installations existantes ou futures (autres que la villa du Rayolet) et les zones de stationnement. Ces critères esthétiques, d'efficacité et de faisabilité nous ont donc permis de sélectionner 6 sites au sein du domaine :

- L'Hôtel de la mer
- Le parking de l'hôtel
- La maison au nord du verger
- La pergola de l'aire naturelle de stationnement
- Le mur arrière du café des jardiniers
- La zone technique

On présente les caractéristiques techniques de chacun des ces sites dans le tableau ci-dessous. Leurs localisations sont données sur la vue aérienne en figure 11.

Site (d'Ouest en Est)	Surface (m ²)	Irradiation solaire annuelle (kWh.m ⁻²)	Energie solaire disponible (MWh)
Hôtel de la mer	400	1650	660
Parking de l'hôtel	250	1400	350
Maison au nord du verger	90	1550	140
Pergola de stationnement	300	1450	430
Mur arrière du café	120	1600	190
Zone technique	80	1400	110
Total	1240		1900

Les données énergétiques présentées ne prennent pas en compte le rendement des panneaux. On se référera au prochain tableau pour quantifier l'énergie fournie par les panneaux. Les données d'ensoleillement ont pu être utilisées plus précisément pour évaluer le potentiel d'une surface précise. Une représentation est proposée en annexe page 45.

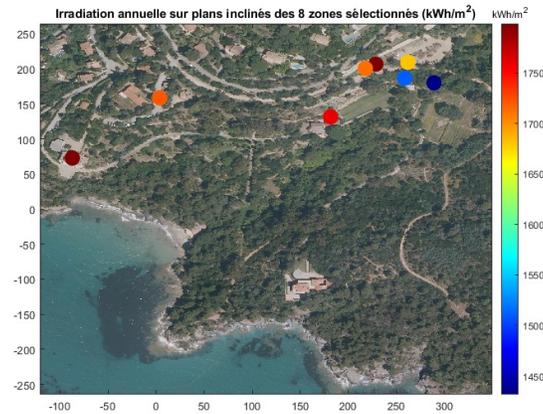


FIGURE 11 – Potentiel photovoltaïque des sites retenus, d’Ouest en Est

Grâce à ces données, les caractéristiques des installations sur ces sites ont pu être déterminées plus précisément, en ajoutant notamment l’orientation des panneaux solaires prévus sur les différents sites : le calcul d’irradiation sur plan incliné pour les différents sites est basé sur les données CAMS Radiation : site de Meteosat, et intègre les effets d’ombrage du relief environnant ainsi que ceux provenant des bâtiments et de la végétation autour. Pour ce faire, un modèle numérique de terrain à 1 m de résolution et un modèle numérique de sursol à 20 cm de résolution issues de l’IGN ont été utilisées. Les moyens de calcul rapide des effets d’ombrage sur les différentes séries sont issues du projet européen H2020 e-shape.

Site (d’Ouest en Est)	Inclinaison prévue	Énergie annuelle récupérable (en MWh, avec $\eta = 0.2$)	Puissance crête (kWc)
Hôtel de la mer	30°	86	58
Parking de l’hôtel	0°	56	40
Maison au nord du verger	toit	22	14
Pergola de stationnement	0°	49	34
Mur arrière du café	5°	31	19
Zone technique	5°	18	13
Total	—	261	178

On retiendra donc que l’installation de panneaux photovoltaïques sur l’ensemble de ces sites nous permettrait théoriquement de récupérer jusqu’à 280 MWh chaque année : cette installation pourrait assurer une grande partie de l’approvisionnement énergétique du jardin tout au long de l’année, sa consommation globale étant de 150 MWh à l’année).

En effet, cette valeur théorique de production n’implique pas que la consommation sera entièrement autonome, même l’été, car le stockage actuellement prévu est insuffisant. La consommation en excès lors de l’absence d’ensoleillement nécessiterait une utilisation du réseau public.

Cependant, la production lors d’une journée ensoleillée est largement supérieure à la consommation et permet au domaine de recharger des véhicules électriques ou de vendre son surplus d’électricité au voisinage dans un rayon de 1 km (limite autorisée par les réglementations en zone urbaine).

Cette production de 280 MWh est toutefois une production potentielle : elle peut être adaptée aux volontés des différents acteurs. En diminuant certaines surfaces ou en supprimant certains sites, on peut entièrement moduler la production annuelle. On peut ainsi décider de produire 150 MWh, autant que la consommation annuelle du domaine. En conservant un stockage raisonnable, il y aura toujours besoin de vendre ou d’acheter de l’électricité selon la période de l’année ou de la journée.

Le prix du panneau solaire dépend du kWc installé, qui dépend de la surface, et de la structure et volonté d’esthétisme de l’installation. Une installation sur un toit avec une petite structure coûtera alors entre 2 et 3 € par Wc, contre un coût compris entre 3 et 4 € par Wc pour une installation nécessitant une structure, qui plus est esthétique. Cela nous amène donc à un coût total pour l’installation de panneaux solaires produisant 280 MWh annuels compris entre 560 000 € et 750 000 €. Pour se limiter à une production annuelle équivalente à la consommation annuelle d’environ 150 MWh, le coût sera compris entre 300 000 € et 400 000 €.

A priori, la production indiquée est une minoration, donc la consommation devrait en réalité être plus importante : en vendant l’électricité produite en surplus, l’amortissement sera plus efficace. Une meilleure estimation de la production sera effectuée si une étude prochaine plus approfondie est faite.

III-A3) *Intégration des installations au paysage*

Un critère essentiel de choix des sites pour l'installation de ces panneaux photovoltaïques a été l'intégration du panneau dans le paysage. Nos installations doivent s'intégrer au mieux possible dans l'esprit, la forme et la consistance du jardin. Le visiteur doit saisir pleinement l'intégration réalisée. Certains de ces panneaux resteront volontairement visibles, pour conférer au jardin un caractère exemplaire et éducatif et pour que le visiteur mesure le fort potentiel pour le photovoltaïque au sein du domaine. D'autres installations seront plus discrètes, pour garder à l'esprit que le jardin du Rayol vit en symbiose avec cette irradiation perpétuelle. Nous montrons ici un exemple d'intégration, au niveau de l'Hôtel de la mer. Les intégrations au niveau des autres sites sont présentées en annexe page 45, avec la présentation rapide de l'alternative que représentent les panneaux colorés.



FIGURE 12 – Le toit de l'Hôtel de la mer : un site idéal, où le panneau serait visible, sans être grossier. La gestion des ombres des cheminées peut devenir délicate

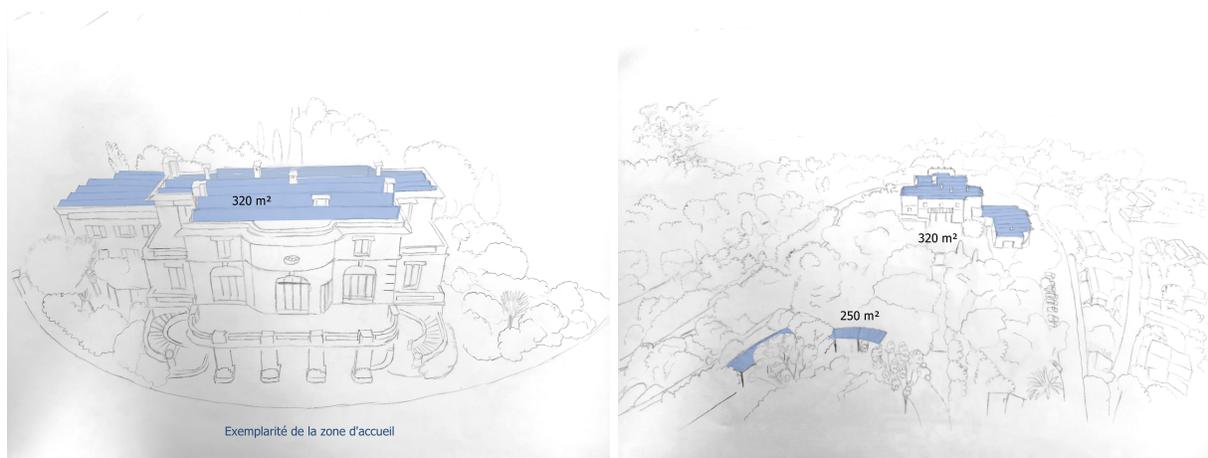


FIGURE 13 – Intégration des panneaux au niveau du toit

III-A4) *Analyse de cycle de vie des panneaux solaires*

Une Analyse de cycle de vie sur les installations de panneaux solaires, décrite en annexe page 44, nous permet de retenir les chiffres suivants :

- Le kWh électrique reviendra à 11,3 centimes, alors que son prix d'achat moyen pour le domaine du Rayol est de 15 centimes d'euros
- L'impact carbone de l'électricité produite par cette installation sera situé entre 17 et 28 g CO_{2eq}/kWh, alors que l'ACV du mix énergétique français se situe actuellement entre 50 et 80 g CO_{2eq}/kWh
- La dépense en énergie primaire pour la construction l'installation sera compensée en 14 mois

III-B) *Le vent, élément qui ne semble pas exploitable*

Le vent constitue une autre source d'énergie *a priori* exploitable. Il fait partie intégrante du climat méditerranéen, tout comme le rayonnement solaire. Mais les dispositifs de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique s'intègrent difficilement au paysage, tout du moins si l'on veut une production suffisamment élevée par rapport à la production photovoltaïque... Cependant, dans un but éducatif, l'éolien n'est peut-être pas à exclure et nous y reviendrons dans la dernière partie de ce rapport.

En effet à l'aide des données issues du modèle MERRA-2 relatives aux vitesses de vent au niveau du domaine, et des caractéristiques de production de deux éoliennes (verticale et horizontale de puissance nominale respective de 2 kW et 1 kW) de taille caractéristique avoisinant les 10 mètres, on peut calculer la puissance moyenne mensuelle que produiraient ces dernières si elles étaient implantées dans les sites moyennement venteux du domaine :

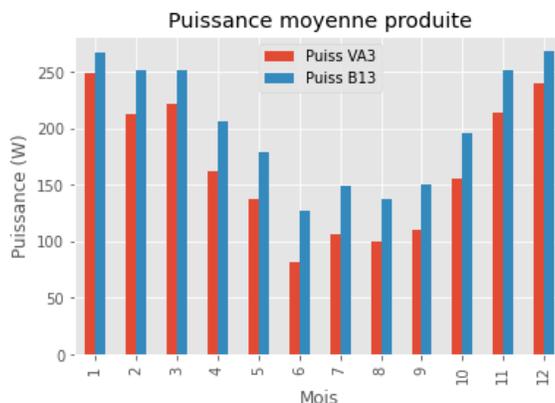


FIGURE 14 – Puissance moyenne mensuelle (moyennée sur les 20 dernières années) que produiraient les deux éoliennes

La puissance générée par ces installations assez visibles et volumineuses est très faible en regard des installations des panneaux solaires (c'est la puissance crête d'à peine 2 m² de panneaux sur le parking de l'Hôtel de la mer...), et ce malgré l'hypothèse optimiste sur la vitesse du vent faite lors de l'emploi des données MERRA-2 (voir comparaison avec les mesures sur le site, page 43). En fait, la vitesse du vent est trop souvent en dessous de la vitesse de démarrage de l'éolienne et, au vu des vitesses de vent rencontrées au domaine, l'éolienne sera souvent bien loin de sa puissance nominale. Nous détaillons dans l'annexe page 41 les raisonnements et calculs qui nous ont conduit à ces conclusions et aux calculs de puissance précédents.

Nous venons de retenir une solution exclusivement photovoltaïque pour commencer à répondre à la demande énergétique du domaine. La suite de cette réponse se fera alors par la gestion d'un réseau électrique efficace prenant en compte ces nouvelles installations, mais aussi des installations de stockage, qui sont, comme nous allons le voir, indispensables pour contrer le manque de corrélation entre consommation journalière et production PV journalière.

IV) Gestion du stockage et du réseau électrique

IV-A) Variations journalières de la demande électrique

IV-A1) Des variations importantes en demande de puissance

Des données de consommation électrique en puissance ont été collectées par Denis Blanquet quelques mois avant notre arrivée au domaine. Les acquisitions de puissance demandées au niveau des deux principaux pôles de consommation témoignent d'une variation journalière et instantanée de demande importante.

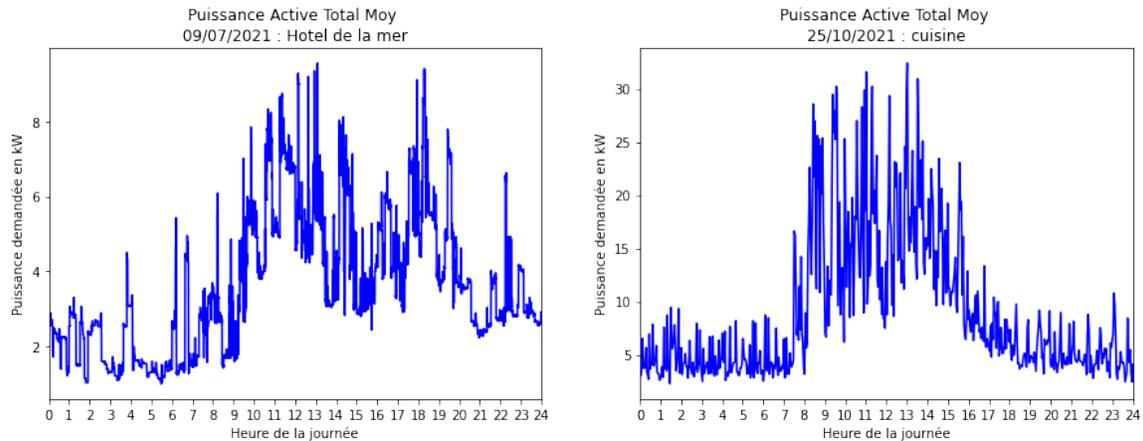


FIGURE 15 – Données de Denis Blanquet

Retenons qu'en novembre 2019, la puissance moyenne appelée par le domaine entier était de 12 kW alors qu'elle a dépassé les 60 kW à certains instants de ce mois. Ces données permettent de dimensionner la puissance acceptable par le réseau électrique du domaine, pour pouvoir répondre à sa demande en électricité.

IV-A2) De l'électricité demandée la nuit

Les mêmes acquisitions de puissance comparées à l'ensoleillement témoignent d'un manque de corrélation :

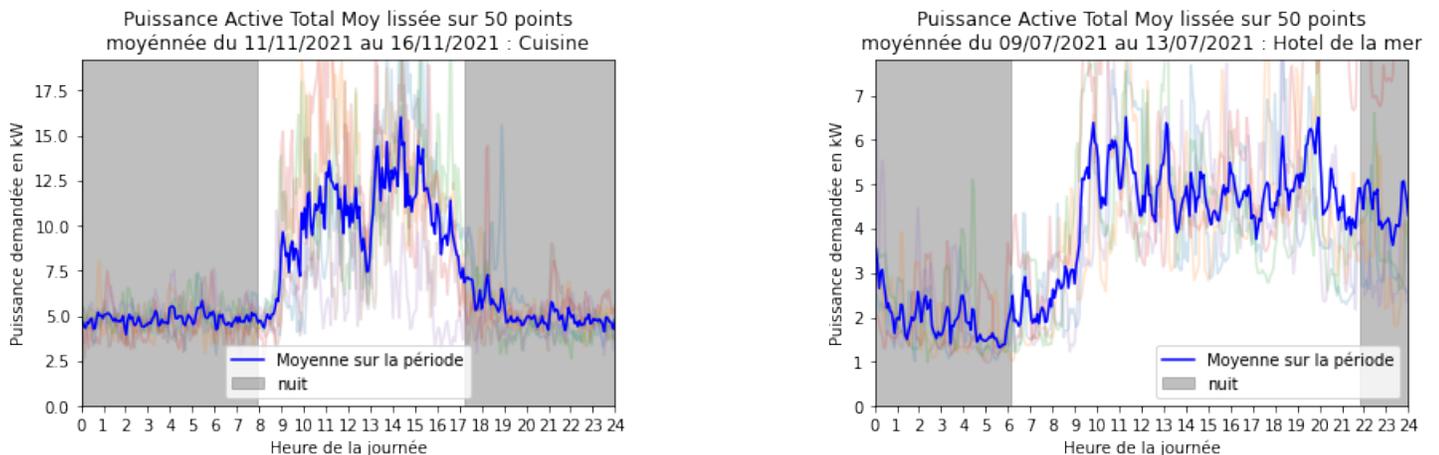


FIGURE 16 – Comparaison des données précédentes à l'ensoleillement

Tout d'abord, ces courbes nous permettent de dimensionner la production électrique que l'on veut : il faudrait au moins que la production en pleine journée soit suffisante pour la consommation. De plus, on voit clairement sur ces graphiques que la consommation électrique ne correspond pas à une éventuelle production d'électricité avec des panneaux solaires : le domaine consomme de l'énergie la nuit, lorsqu'il n'y a plus de soleil.

IV-A3) *Une nécessité : stocker l'énergie*

Les deux parties précédentes nous indiquent que le domaine va devoir stocker une partie de l'énergie qu'il produit, si on veut le rendre le plus autonome possible à l'aide d'une production solaire.

L'étude mensuelle de la demande énergétique montre que le domaine ne peut pas produire toute l'électricité qu'il nécessite dans son état actuel. En effet, dimensionner une installation de panneaux solaires pour qu'elle couvre la totalité de la consommation énergétique électrique en hiver n'est pas envisageable car cela conduirait à une nette surcapacité en été et donc un surdimensionnement non souhaitable de l'infrastructure de production photovoltaïque. C'est ici que la solution d'un chauffage moins consommateur prend tout son sens. Dans cette étude, il ne sera pas envisagé de stockage intra-saisonnier, qui demande des infrastructures de trop grandes tailles avec des coûts rédhitoires et montrerait peu d'utilité : il ne serait utilisé que durant 4 à 5 mois d'hiver.

À l'échelle journalière, nous avons vu qu'il faudrait du stockage pour la consommation nocturne. Pour assurer au maximum l'auto-suffisance du domaine, il faut dimensionner un système de stockage permettant de répondre à ces variations journalières. Ceci doit se faire d'une manière efficace tout en restant en cohérence avec l'esprit des solutions techniques que nous présenterons (et plus précisément celles concernant la gestion de la ressource en eau).

IV-A4) *Les diverses possibilités techniques pour assurer un stockage suffisant*

Au vu de l'étude ci-dessus, le système de stockage utilisé doit pouvoir supporter des variations de tension et d'intensité relativement importantes. Les méthodes de stockage chimique (hydrogène et utilisation d'une pile à hydrogène par exemple) sont à exclure. Nous avons retenu quelques types de batteries et le système de μ -STEP pour répondre à la demande électrique.

Cette dernière alternative souligne le rôle prépondérant que pourrait jouer la gestion de l'eau dans le bon fonctionnement de notre système dans sa globalité. Elle sera présentée en détail dans la partie suivante, qui s'attardera donc sur la gestion de la ressource en eau. Mais avant cela, nous pouvons finir de réfléchir à la gestion électrique du domaine en examinant les diverses possibilités techniques permettant d'aboutir à un réseau électrique en intelligence avec les installations proposées (on intégrera la technologie de μ -STEP aux installations, en admettant pour l'instant son dimensionnement).

IV-B) *Le réseau électrique*

IV-B1) *Gérer le problème des surtensions - transformateur d'isolement*

Le réseau électrique du domaine du Rayol a aujourd'hui un problème primordial à régler : la tension en ligne en triphasé arrivant au domaine est de plus de 240 V en ligne, ce qui est beaucoup trop élevé :

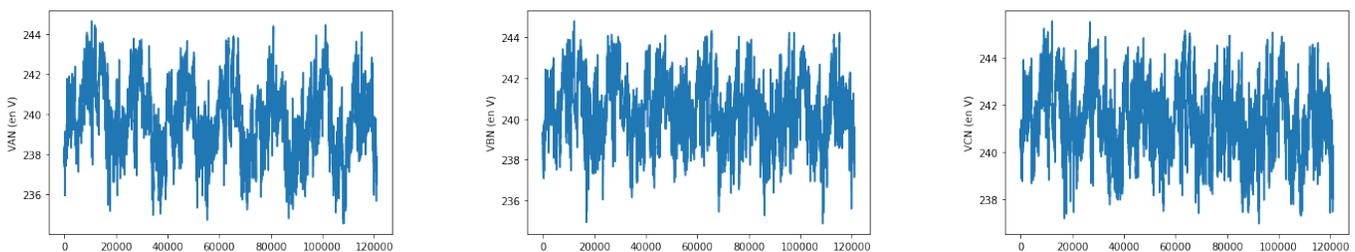
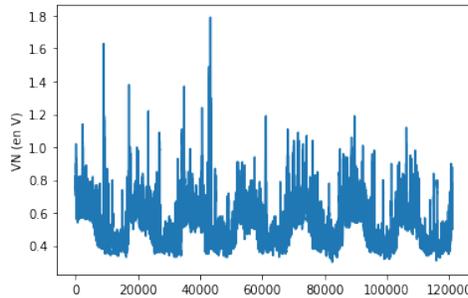


FIGURE 17 – Évolution de la tension sur les 3 phases au cours d'une journée

Le problème est que les onduleurs photovoltaïques se mettent en sécurité et arrêtent de produire de l'électricité quand la tension en ligne dépasse les 245 V. Il faut donc absolument être capable de baisser la tension en ligne sur l'ensemble du domaine pour être capable d'avoir une installation photovoltaïque productive sur le domaine. Pour cela, il existe 2 solutions :

- Demander à Enedis de baisser la tension au niveau du poste de distribution électrique
- Ajouter un transformateur d'isolement 400V/400V triphasé après le poste de distribution Enedis. Cette solution permet de régler le problème de surtension sur le réseau, tout en réglant la tension du neutre à 0 V, car la tension du neutre sur le domaine n'est pas nulle, ce qui pose aussi un problème (figure ci-dessous)



IV-B2) *Retrouver le réseau existant ou en refaire un ?*

Une fois le problème de tension en ligne réglé, il faut connaître le réseau du domaine afin de pouvoir installer des panneaux photovoltaïques et une turbine pour la μ -STEP. Le problème est que les plans du réseau ont été perdus. On peut alors choisir de faire venir une entreprise d'archéologie de réseau pour retrouver le réseau déjà existant. Si le réseau en place convient, on peut alors greffer les nouvelles installations au réseau. On peut aussi choisir de refaire totalement le réseau électrique.

On propose ici un nouveau plan de réseau sur lequel sont représentés les câbles enterrés en 400 V triphasé.

Le café des jardiniers (en rouge) est relié au poste de distribution Enedis (en bleu) à l'aide d'une ligne capable de passer toute la puissance nécessaire au domaine, par l'intermédiaire d'un transformateur d'isolement. Le café des jardiniers sert ensuite de centre de distribution d'un réseau en étoile qui relie les différents bâtiments par l'intermédiaire de lignes triphasées enterrées le long des différentes routes du domaine.



FIGURE 18 – Proposition globale d'un nouveau réseau électrique

La norme NF 15-100 nous impose que la tension dans le réseau ne doit pas varier de plus de 5% lors des appels de puissance. Afin de rester aux normes lors des appels de courant (démarrage d'un poste à souder, d'un four par exemple), il faut placer des absorbeurs de pic de puissance près des lieux d'appel. Le choix de batterie pour réaliser cette fonction (technologie Eaton de Nissan qui présente l'avantage d'utiliser des batteries recyclées) permet en plus de stocker le surplus d'énergie produite par les panneaux photovoltaïques durant la journée et de la redistribuer pendant la nuit.

Comme les appels de puissance sont principalement situés au niveau du café (fours) et de la zone technique (poste à souder) juste à côté du café, un container de 10 batteries peut être disposé au niveau du café. Il offre une capacité de stockage de 42 kWh pour une puissance maximale délivrée de 36 kW. Ces batteries sortent une tension en monophasé qu'il faut donc recomposer en triphasé avant de la remettre dans le réseau du domaine, si on souhaite l'injecter dans les lignes triphasées.

```

variation de tension sur la phase A en pourcentage : 1.9173913043478246
variation de tension sur la phase B en pourcentage : 1.7913043478260888
variation de tension sur la phase C en pourcentage : 2.226086956521741

```

FIGURE 19 – Appels de puissance au domaine du Rayol sur une ligne sollicitée uniquement par de faibles appels de puissance (pas de poste à souder ou de fours), données sur des lignes plus sollicitées non disponibles, mais de façon évidente plus conséquentes). Les données analysées ici sont celles de Denis Blanquet.

IV-B3) *Îlotage du domaine et indépendance énergétique ?*

Si le domaine possède après ce projet des moyens de production énergétique (panneaux solaires) et des moyens de stockage de l'énergie produite (batteries et μ -STEP), il n'est néanmoins absolument pas pertinent d'envisager une déconnexion totale du réseau de distribution pour le domaine. En effet, les capacités de production et de stockage du domaine ne sont pas suffisantes pour assurer son autonomie énergétique. De plus, si les batteries et la μ -STEP sont pleines, le choix d'une déconnexion totale du réseau obligerait à couper les onduleurs photovoltaïques afin d'arrêter la production, alors qu'avec un raccord au réseau, on peut continuer de produire et revendre le surplus sur le réseau.

Pour assurer le fonctionnement général de cette solution électrique, il faut donc une bonne gestion de la technologie de μ -STEP, qui passe nécessairement par la bonne gestion de la ressource en eau. Cette gestion pourra même intégrer des systèmes de récupération d'eau permettant une réponse plus efficace et durable à la demande en eau du domaine.

V) Gestion de la ressource en eau

V-A) Réseaux d'irrigation

V-A1) Nécessité du stockage de l'eau

Par analyse des factures de consommation d'eau, le domaine a une consommation d'eau globale de l'ordre de 7 000 m³.an⁻¹. Une grande partie de cette consommation (près de 80%) est utilisée pour le jardin. La répartition de cette consommation est précisée dans le tableau ci-dessous.

Année	Arrosage manuel	Arrosage intégré	Total jardins	Dépense d'eau [total]
1995	Consommation des mois d'octobre, novembre et décembre.			1337
1996				8470
1997				9017
1998	Aucunes documentations sur cette année.			?
1999				6144
2000	1379	3509	4888	5731
2001	1140	4838	5978	7446
2002	808	4419	5227	6724
2003	1340	5045	6385	7472
2004	1197	3783	4980	6065

FIGURE 20 – Détail des dépenses en eau (en m³) du domaine entre 1995 et 2004

La pluviométrie mensuelle au niveau du domaine affichée sur le graphe ci-dessous, dont les données sont issues du modèle météorologique de réanalyse MERRA-2 : [lien du site de MERRA-2](#). En étudiant ces données, on montre que la période avec le plus grand besoin en eau (80% des besoins entre mai et septembre, soit 40 m³.jour⁻¹) ne correspond pas à la saison des pluies. Il semble donc nécessaire de stocker de l'eau (ou du moins forcer sa récupération en vue d'un stockage), pour lutter face à cette variabilité de pluviométrie. Il est difficile de dimensionner ce stockage nécessaire : les variations mensuelles de l'apport de la source d'eau principale du domaine (décrite juste après) n'est pas encore totalement quantifiés.

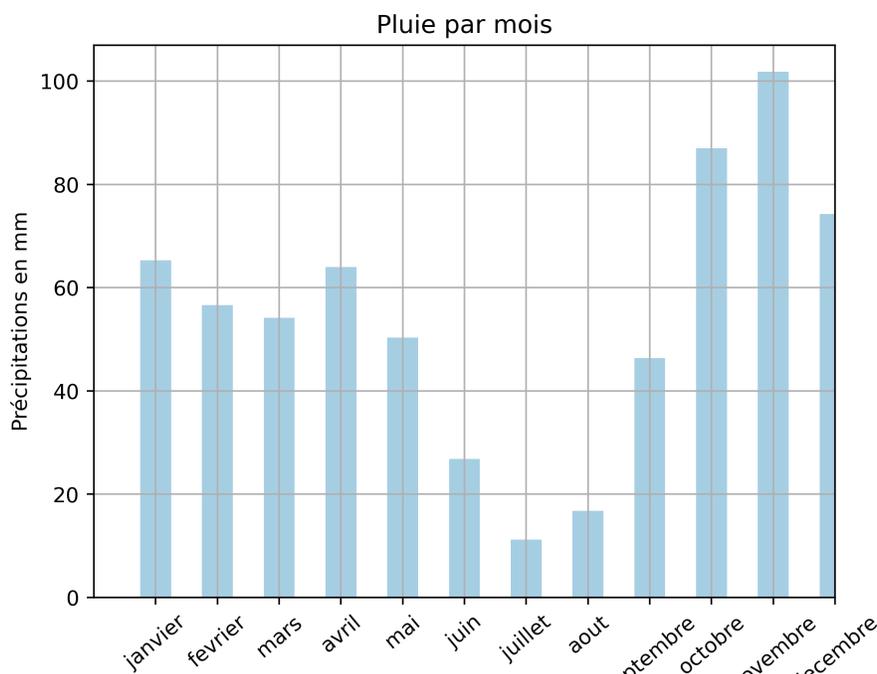


FIGURE 21 – Précipitations mensuelles moyennes sur les 40 dernières années : moyenne de 650 mm.an⁻¹

V-A2) Étude hydrogéologique des sources d'eau du domaine

Nous devons donc maintenant évaluer le potentiel qualitatif et quantitatif de la ressource en eaux souterraines du domaine du Rayol. Pour répondre à cet objectif nous avons réalisé un pré-diagnostic des deux principaux ouvrages présents sur le domaine :

- La source située au Nord de la voie verte
- Le puits de Chine situé en contrebas du restaurant du domaine.

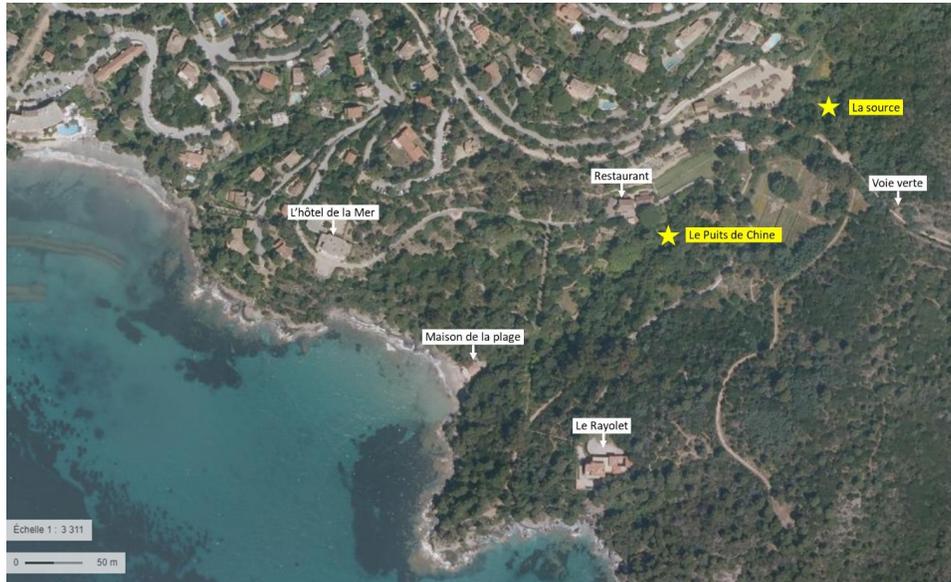


FIGURE 22 – Localisation des ouvrages

Ce pré-diagnostic a été réalisé le 29/11/2021 en présence de deux hydrogéologues : Frédéric PRETOU du Cabinet CETRA de Laroie (64) et de Sébastien MORILHAT du CEA de Cadarache (13). Il s'appuie sur les investigations réalisées sur le terrain le 29/11 et les données enregistrées par deux capteurs de pression positionnés dans le puits et dans le captage de la source le 22/11 et récupérés le 29/11 en fin de journée.

Nous présentons maintenant les mesures réalisées et les conclusions associées. Il peut être intéressant de connaître précisément les principales caractéristiques géologiques de ces deux sources étudiées avant d'attaquer l'analyse de ces mesures, elles sont exposées en annexe page 46. On en retiendra surtout cette photo légendée du fond de la source :

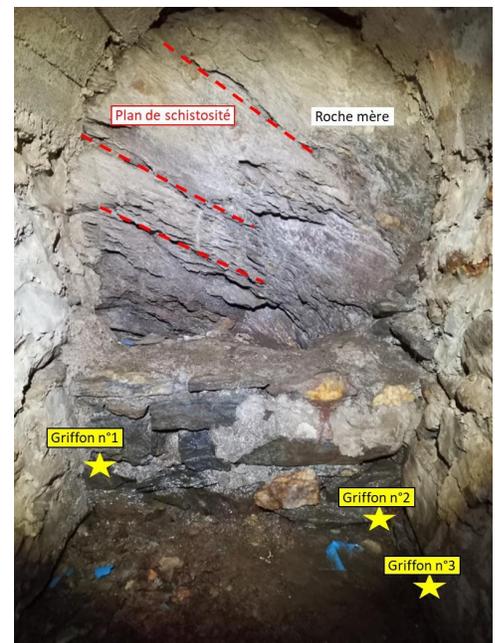


FIGURE 23 – Photo de l'intérieur du captage

Suivi de la conductivité électrique des eaux :

La mesure de conductivité devant la source est trop élevée compte tenu du contexte géologique local. Puis en analysant la conductivité de l'eau sortant des deux yeux situés au fond de la source, nous observons que l'eau de l'œil de gauche est moins conductrice que l'eau de l'œil de droite. De plus, la mesure de la conductivité dans la source diminue avec la profondeur (passé de 618 à 566 μS).

Les roches aux alentours de la source ont l'air d'être des roches magmatiques (acides avec peu d'échanges d'ions) donc on s'attendait à avoir une conductivité plus basse que ce que l'on a obtenu. On en déduit de ces mesures qu'il n'y a pas que des roches magmatiques qui sont en jeu. En considérant les observations géologiques, ceci peut être dû à la présence de roches métamorphiques comme les micaschistes. Les observations comparatives dans les deux yeux nous permettent de déduire que l'eau de l'œil de gauche a récupéré de l'eau de pluie de surface (conductivité abaissée) alors que l'eau de l'œil de droite a plus ruisselé via les roches feuilletées en provenance des roches fracturées en profondeur (conductivité plus haute). Finalement, l'augmentation de la conductivité avec la profondeur peut être due à la présence de déchets rouillés (poutrelle, vanne, tôle...) abandonnés au fond du captage.

La conductivité électrique nous aide donc à analyser l'origine et le trajet de l'eau de la source mais peut aussi apporter des éléments de réflexion sur la qualité de la ressource. Pour analyser la qualité de l'eau, il faudrait faire une analyse des métaux lourds dans l'eau pour voir si on peut l'utiliser pour l'arrosage (par exemple, l'excès de fer n'est pas bon pour l'arrosage) et également faire une analyse bactériologiques pour identifier la présence éventuelle d'eaux usées.

Suivi du débit de l'eau pompée :

Nous avons pompé de l'eau hors de la source avec un débit de 9 l.s^{-1} ce qui donne $15 \text{ m}^3.\text{j}^{-1}$ et le niveau d'eau du puits n'a pas bougé. Ces mesures sont réalisées 4 jours après des précipitations de 53 mm maximum en une nuit. Dans la source les deux yeux ont un débit total de $12 \text{ m}^3.\text{j}^{-1}$. On pourrait donc extraire au moins $15 \text{ m}^3.\text{j}^{-1}$ de la source et il y a sûrement une autre entrée d'eau dans la source ce qui augmente le débit total de la source.

Nous pourrions alors pomper de l'eau en continu de la source et la stocker dans un réservoir que l'on insérerait à côté ou bien la rediriger vers d'autres réservoirs du jardin pour la stocker et pouvoir satisfaire les besoins en eau du jardin, surtout pendant les épisodes de sécheresse.

Il faudrait alors refaire les mesures en période sèche pour voir si le débit de la source est le même ou s'il dépend des saisons, refaire des mesures de débit à la source après plusieurs semaines sans précipitations pour savoir si le débit de la source varie en fonction des précipitations et refaire des mesures de débit à la source sur plusieurs années pour voir s'il varie d'année en année. De plus, on peut tenter de vider la source avec une pompe qui a un débit plus élevé pour essayer d'avoir accès au débit maximal de production de la source à l'étiage.

Suivi des niveaux d'eau dans la source et dans le puits

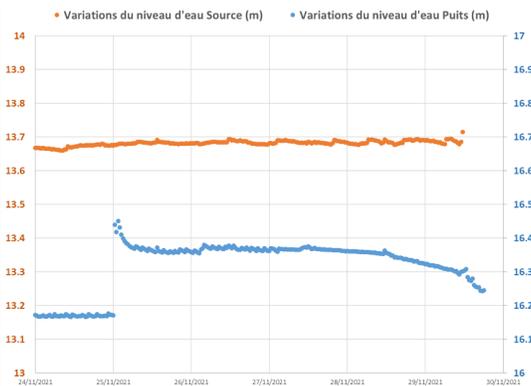


FIGURE 24 – Suivi des variations du niveau d'eau dans le Puits et dans la source entre le 22/11/2021 et le 29/11/2021. Contexte des précipitations : nuit du 24 au 25 novembre : 53 mm, du 25 au 26 novembre : 14 mm, 27 novembre : 5,5 mm

On en déduit que lorsqu'il pleut, le niveau de l'eau de la source ne varie pas donc il y a un certain équilibre qui est atteint. On en déduit alors que l'eau provient d'un réservoir ou nappe souterraine suffisamment profond pour ne pas être influencé par les eaux superficielles. *Cela témoigne d'une réserve d'eau significative qui pourrait être exploitée pour l'irrigation.*

Au contraire, le niveau d'eau dans le puits est fortement influencé par les précipitations puisque le puits est alimenté par les eaux de ruissellement du vallon. De plus, les précipitations remplissent alors le puits qui varie ensuite peu à peu vers un équilibre en renversant de l'eau jusqu'au bassin connecté au puits. Il reste alors à savoir si une petite partie des eaux qui l'alimente ne pourrait pas être d'origine souterraine. Pour vérifier cette hypothèse, il faut alors assécher complètement le puits en période d'étiage pour voir si une réalimentation peut être observée. → *Il y a peut-être des nappes souterraines au niveau de la source que l'on pourrait exploiter.*

Suivi de la température dans la source et dans le puits

L'eau de l'œil de gauche est moins chaude que l'eau provenant de l'œil de droite au fond de la source. On en déduit que l'eau de l'œil de droite provient de roches en profondeur.

On a aussi relevé l'évolution des températures au niveau des deux sources le long d'une semaine :

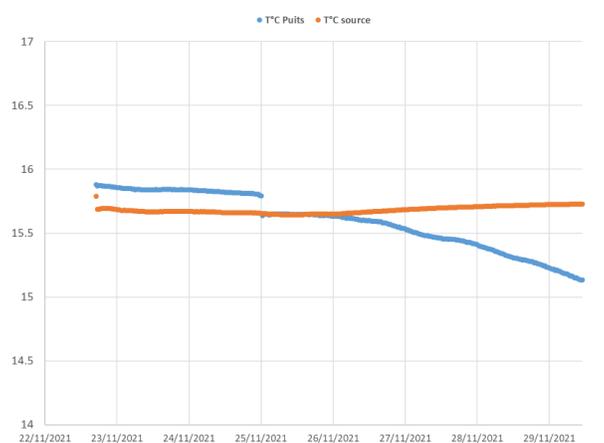


FIGURE 25 – Suivi des variations de la température d'eau dans le Puits et dans la source entre le 22/11/2021 et le 29/11/2021

La température de l'eau de la source ne varie presque pas avec les précipitations, on en déduit que l'eau des précipitations s'infiltre dans les roches fracturées en surface ou en profondeur et sa température se réajuste avant de terminer dans la source. L'eau du puits se rafraîchit avec les précipitations donc l'eau froide de la pluie se déverse directement dans le puits. Cela confirme les hypothèses issues de l'analyse précédente relative aux variations des niveaux d'eau.

Petit ruisseau à côté de la source :

Il s'agit d'un ruisseau qui coule le long du talweg situé plus à l'ouest de la source et qui passe ensuite dans le tunnel qui va au vieux verger. Mesures : débit : $6 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$, conductivité : $1070 \mu\text{S}$, température : $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Cela suggère que l'eau a ruisselé au sein des roches fragmentées en profondeur car l'eau est assez chaude et conductrice ou alors que ces eaux sont « polluées » par des rejets d'eaux usées ou la présence de déchets enterrés dans le vallon. Nous pourrions donc récupérer l'eau de ce ruisseau pour compléter la collecte d'eau à la source même si son débit est plus faible.

Finalement, les deux arrivées d'eau (source et petit ruisseau) ne sont pas connectées car les débits ne sont pas perturbés. De plus la source se régénère donc elle est exploitable. Enfin, l'eau s'infiltre donc il y a une potentielle nappe souterraine qui communiquerait avec la source. Cette dernière hypothèse nécessite plus d'analyses pour localiser et mieux comprendre les flux d'eau naturels. Il faudra, comme on l'a vu, quelques installations pour optimiser toute cette ressource en eau. Elles sont détaillées et chiffrées en annexe page 46.

V-A3) Identification et caractérisation des ressources en eau par récupération d'eau de pluie

Il peut s'avérer efficace de récupérer les eaux de pluie au niveau des toits : avec les données pluviométriques et la surface des différents toits du jardin, on peut quantifier la quantité d'eau récupérable par cette méthode en fonction des toits équipés :

Localisation du toit	Surface horizontale (m^2)	Volume d'eau annuel récupérable (m^3)	Part de la demande en eau
Restaurant	110	72 (11)	1.3
Salle à manger	100	65 (10)	1.2
Ombrière	165	110	2
Ombrière (PV)	700	450	8
Hôtel de la mer	525	340	6
Total	b	b	b

TABLE II – Description des potentiels sites de récupération d'eau de pluie.

Notons que nos prévisions sont idéalisées et qu'il existe déjà de tels dispositifs au niveau du Rayolet et du bastidon (possibilité d'alimenter les toilettes).

On peut largement compléter ces récupérations d'eau par ruissellement au niveau de la route principale (vers la citerne du puits, par récupération avec gouttière sur le bord de la route) et de la colline entre le sommet du domaine et la route au bord. Il s'agirait de la faire ruisseler jusqu'à la citerne de l'*impluvium* (ou au niveau du verger, en récupérant l'eau sur la colline, avec une gouttière qui longe la route puis un tuyau qui passe en dessous pour rejoindre la citerne de l'*impluvium*), puis d'utiliser la possibilité d'une irrigation par gravitation. On regroupe ci-dessous ces zones de récupération potentielle de l'eau et les volumes d'eau de pluie potentiellement récupérable.

Localisation du ruissellement	Surface horizontale (m ²)	Volume d'eau annuel récupérable (m ³)	Part de la demande en eau
Colline	25 000	1600	29
Route principale	7000 ?	500 ?	10

L'eau récupérée pourra être stockée dans les cuves dédiées au stockage d'énergie (cf. μ -STEP plus bas), dans une cuve de 3 à 5 m³ qui serait intégrée au niveau du restaurant, ou peut-être dans la cave de l'hôtel de la mer (solution à étudier plus en profondeur...). Ces méthodes de récupération ne sont probablement pas suffisantes pour assurer la récupération nécessaire à un stockage conséquent d'eau, sauf si l'on essaye d'arrêter de travailler en circuit ouvert et que l'on commence à réfléchir à un circuit fermé basé sur la récupération des eaux usées.

V-B) *Un circuit qui se ferme : épuration des eaux usées par lagunage naturel*

La gestion des ressources en eau semblant être une problématique majeure dans notre projet, au vu des quantités d'eau consommées, en particulier pour l'arrosage, nous avons étudié la possibilité d'implémenter des lagunes naturelles dans le jardin afin de pouvoir réutiliser les eaux usées provenant des différents bâtiments. De manière générale, le lagunage naturel repose sur le développement en interaction de bactéries et d'algues. Les bactéries (qui se développent grâce à l'oxygène libéré par les algues et libèrent du CO₂ pour celles-ci) participent à la digestion de la matière organique. Les apports d'énergie solaire et de matière organique au système permettent son auto-entretien.

V-B1) *Le système retenu, et description de son intégration dans le jardin*

Nous avons décidé d'intégrer un système de quatre bassins communicants, au niveau de l'ancien verger sur les quatre terrasses les plus hautes. En plus de ces bassins il est nécessaire d'introduire un système de pré-traitement en amont. Les figures ci-dessous présentent l'aspect du système de lagunage, ses dimensions ainsi que son intégration paysagère :



FIGURE 26 – Localisation des 4 bassins (en bleu sur les cartes), et vue aérienne des terrasses

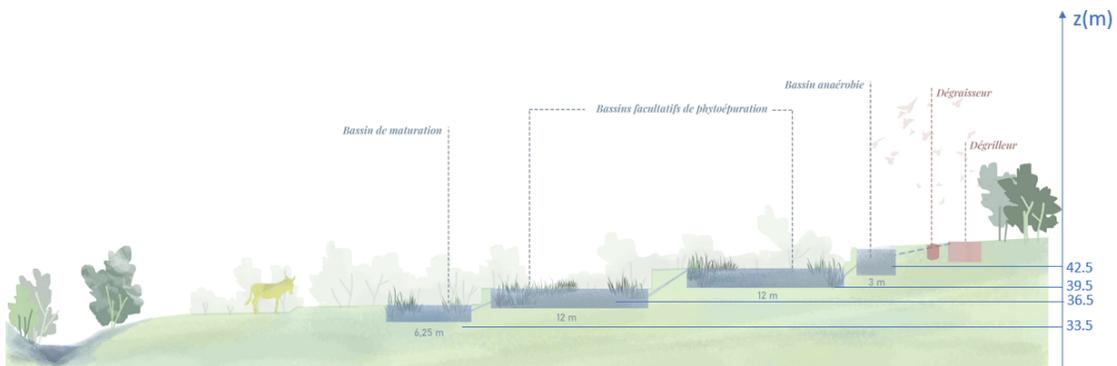


FIGURE 27 – Altitude des différents bassins, vue en coupe du profil de l'ancien verger rénové



FIGURE 28 – Intégration paysagère des lagune (sans lagunes à gauche, avec à droite)

V-B2) Rôle, dimensions et population végétale des bassins

Chaque bassin installé a un rôle précis. Nous détaillons ci-dessous l'utilité de chaque partie de ce système :

Tout d'abord il nous faut faire un pré-traitement de l'eau avant l'entrée dans les bassins : il y a nécessité d'un prétraitement, qui peut être assuré grâce aux dispositifs suivants :

- Un **dégrilleur** pour retenir les gros objets et éviter de boucher prématurément les tuyaux reliant les différents bassins. Pour la quantité d'eaux usées à traiter (inférieure à 2000 EH, où EH est un Équivalent-Habitant, qui quantifie l'impact d'un habitant -ici un employé du domaine ou un visiteur- sur le rejet des eaux usées. 1 EH = $60 \text{ gDBO}_5 \cdot \text{jour}^{-1}$ ou la DBO_5 est la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes présents dans le milieu pour oxyder les substances organiques contenues dans un échantillon pendant 5 jours), on préférera un dégrilleur manuel incliné (de 60° à 80° par rapport à l'horizontale) à écartement de barreaux d'environ 4 cm
- Un **dessableur** pour le dépôt de sables et graviers au fond d'une fosse
- Un **déshuilage** mécanique qui permet de retenir les graisses et les déchets flottants.

Notons qu'il existe également des systèmes dessableur-dégraisseur et que les déchets pourront être revalorisés (récupération des sables et graviers) ou incinérés.

Ensuite on arrive au réseau de bassin dont les noms sont décrits ci-dessous :

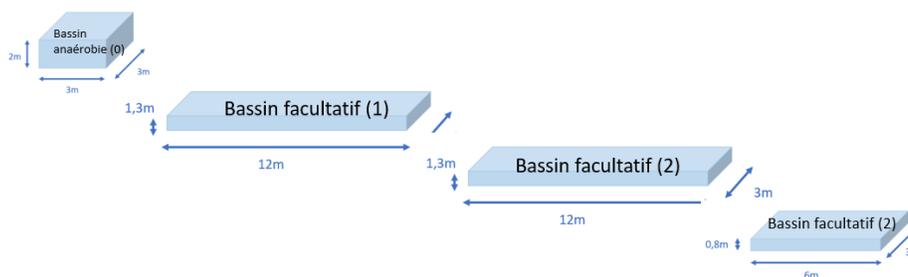


FIGURE 29 – Description des 4 bassins

- 0. Le bassin anaérobie** : premier bassin de la chaîne, le bassin anaérobie a pour objectif de stabiliser les boues et de traiter les eaux usées. Ce bassin est profond pour permettre le développement de bactéries anaérobies qui vont se développer en profondeur dans des eaux ayant une concentration en oxygène plus faible. La pollution est alors réduite par sédimentation et digestion des déchets par les bactéries anaérobies (qui dégage à la surface du méthane et du dioxyde de carbone) De tels bassins sont particulièrement efficaces pour des températures supérieures à 15°C et permettent de réduire de 60% la charge en DBO_5 . Le temps de passage dans ce bassin est 6 jours. **Bassin microphyte** : les plantes sont uniquement représentées par du phytoplancton et des algues microscopiques (de l'ordre du centième de mm). Les bactéries vont venir également jouer un rôle essentiel par la minéralisation

- 1 et 2. Les bassins facultatifs** : Ces deux bassins sont beaucoup plus grands que le premier. L'eau va passer le plus de temps dans ces bassins (15 jours dans chaque bassin). La profondeur est faible pour préserver l'aérobiose à la surface. Il s'y développe des bactéries facultatives ou aérobies, qui peuvent tolérer des variations de concentration en oxygène dissout ou vivre insensiblement quelque soit l'oxygénation de l'eau. Les composés réduits migrent vers a couche aérobie où ils sont oxydés. Des algues se développent dans la partie supérieure du bassin, utilisant le CO_2 libéré par les bactéries, libérant de l'oxygène permettant justement le développement des bactéries.
- 3. Le bassin de maturation** : ce dernier bassin, aussi appelé bassin de clarification, est de très faible profondeur (moins d'un mètre) pour laisser la lumière traverser les différentes profondeurs et permettre le développement de plantes, algues et bactéries (bassin entièrement aérobie). Le temps de passage dans ce dernier bassin est assez faible (5 jours). C'est un bassin macrophyte. Des plantes, immergées ou émergées, visibles à l'œil nu s'y développent (roseaux, joncs, jacinthes d'eau, lentilles d'eau, etc). L'effet épuratoire des plantes est plutôt élevé (ces plantes peuvent extraire les nutriments de l'eau et créent un support aux micro-organismes présents) et ces bassins ont l'avantage de présenter un aspect esthétique et paysager intéressants. Les zooplanctons se développent également dans ce bassin.

Dans le bassin macrophyte, diverses plantes permettent de filtrer le phosphore, l'azote, les contaminants émergents et certains métaux. Dans le bassin microphyte, certaines algues consomment le carbone organique présent dans leur environnement, réalisent la photosynthèse : elles fixent le CO_2 et éventuellement le diazote et libèrent du dioxygène.

V-B3) *Dimensions des bassins*

Il s'agit maintenant d'évaluer la taille nécessaire des bassins. Ce dimensionnement repose sur une évaluation de l'impact des infrastructures du jardin sur les eaux du domaine. On estime pour cela la charge brute en DBO_5 chaque jour :

- Bureau : $\frac{1}{3}$ EH par employé \rightarrow 10 EH
- Habitants : 1 EH par personne \rightarrow 2 EH
- Restaurant : $\frac{1}{3}$ EH par couvert \rightarrow 12 EH (environ 50 couverts par jour)
- Visiteurs : $\frac{1}{50}$ EH par personne \rightarrow 4 EH (environ 200 visiteurs par jour en moyenne)

Au total, on obtient 30 EH par jour environ, soit 1800 g de DBO_5 par jour.

Avec une charge volumique C_v , prise égale à $C_v = 100 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ et une profondeur $h = 2 \text{ m}$, on retrouve la surface S du premier bassin par la formule :

$$S = \frac{\text{charge brute } \text{DBO}_5}{C_v \times h}$$

puis le temps de passage dans les bassins défini comme le rapport du volume par le débit volumique en sortie $D_{0 \rightarrow 1}$.

La surface des bassins facultatifs s'obtient par :

$$S = \frac{\text{charge } \text{DBO}_5 \text{ en sortie du premier bassin}}{C_s}$$

avec C_s la charge surfacique de conception prise égale à $100 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ et on calcule de même que précédemment le temps de passage dans ce bassin.

Enfin, le temps de passage dans le dernier bassin étant imposé à 5 jours, on en déduit son volume et sa surface (on choisit une profondeur faible).

V-B4) *Solutions à quelques problèmes potentiels*

Problèmes	Solutions
Risque de mauvaise odeur (surcharge, encombrement des tuyaux ou conditions météorologiques)	Augmenter la fréquence de passage de l'entretien, ou injection de sulfate de fer, de chlorure ferrique ou de nitrate de Calcium, augmentation du pH...
Bassins vides ou trop remplis	Imperméabilisation des fonds des bassins (argile...), installation de vantaux ou robinets entre les bassins, estimation de l'évolution des hauteurs d'eau (cf partie suivante)
Entretien	Inspection des bassins, vider le dégrilleur

FIGURE 30 – Des problèmes solutionnés

Sources : *procédés d'épuration* et *Etude d'extension et d'optimisation de la STEP de la ville de Taourit* (mission 4).

Pour résoudre totalement le deuxième problème, nous procédons donc à une estimation des variations de hauteur d'eau dans les bassins qui permet d'estimer une marge à prendre pour éviter un débordement.

L'entrée d'eau : on considère que le volume d'eaux rejetées est en ordre de grandeur équivalent au volume d'eau consommé en dehors de l'arrosage, soit entre 1000 et 1500 m³ d'eau par an, soit environ 125 m³ par mois (si la consommation est constante au cours de l'année). (source : étude SOGREAH eau 2005)

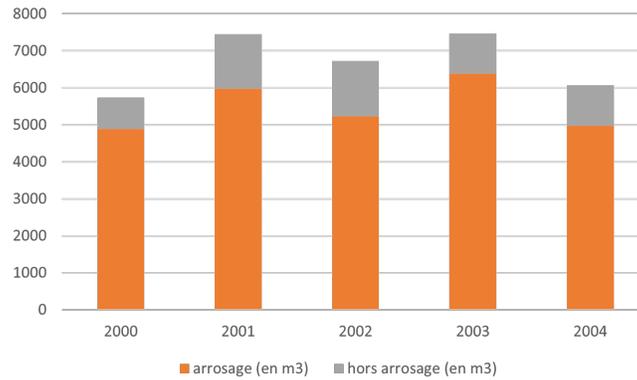


FIGURE 31 – Volume d'eau consommé annuellement par le jardin en m³ → volume en entrée des lagunes

Les données de pluviométrie étudiées précédemment, nous avons besoin d'un calcul du volume d'eau évaporé chaque mois. Un modèle physique simple permet d'aboutir aux résultats ci-dessous :

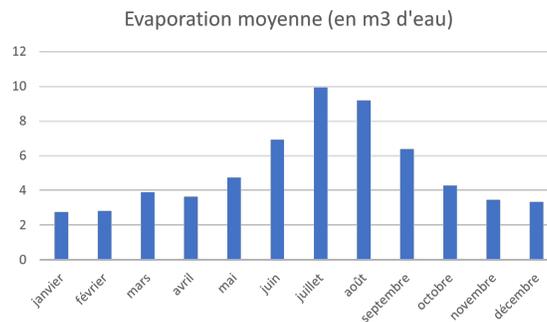


FIGURE 32 – Évolution mensuelle des volumes d'eau évaporée des lagunes

Avec quelques considérations de mécanique des fluides (présentées en annexe) en plus de ces données, on arrive à modéliser les variations de hauteur d'eau des bassins au cours de l'année :

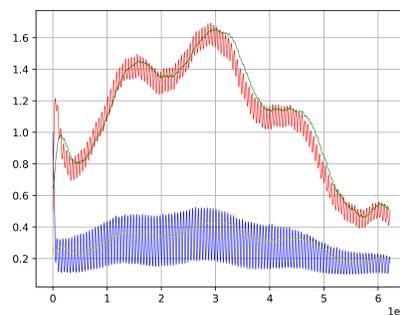


FIGURE 33 – Evolution temporelle des niveaux d'eau prévus dans les bassins 0 (en bleu) et bassin 1 (en rouge) pendant 24 mois (Hauteur en m en fonction du temps en secondes). Le niveau d'eau dans les bassins 2 et 3 restent proches de celui du 1.

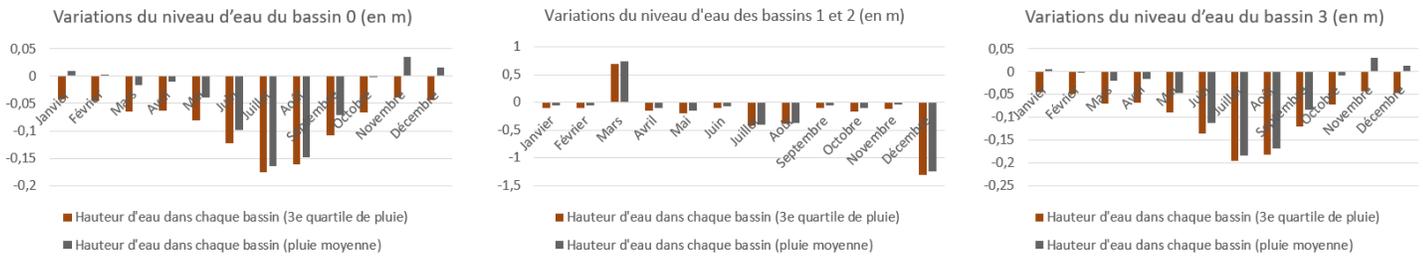


FIGURE 34 – Résultats de notre modélisation pour l'étude de l'évolution des hauteurs d'eau dans les bassins de la lagune

On peut aussi prévoir l'évolution du niveau d'eau dans les bassins si l'on décide de fermer la sortie finale (pour remplissage et donc stockage important) :

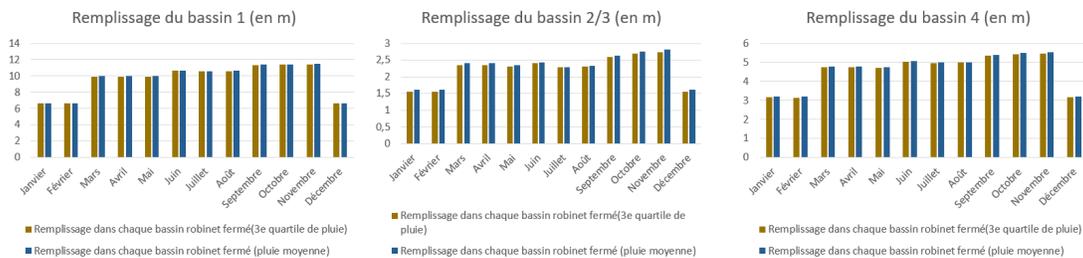


FIGURE 35 – Résultats de notre modélisation pour l'étude de la vitesse de remplissage des bassins

V-C) Un réseau d'eau en lien avec les énergies : la technologie de μ -STEP

V-C1) Fonctionnement de la μ -STEP

Après avoir choisi et dimensionné les moyens de production d'énergie, deux constats ont été faits. D'une part, l'énergie produite suffit à répondre aux besoins du domaine en été, mais pas en hiver en raison des besoins en chauffage et des journées plus courtes. D'autre part, même à l'échelle d'une journée, on remarque que la production d'énergie est excédentaire en pleine journée alors qu'on aurait besoin d'utiliser cette énergie la nuit. De fait, on constate deux solutions possibles : soit renvoyer l'énergie excédentaire sur le réseau pour réduire les factures, soit assumer au maximum la volonté d'autosuffisance, ce qui signifie qu'il faut stocker cette énergie. Pour ce faire, on utilise bien souvent des batteries chimiques. Néanmoins, dans l'objectif d'écoresponsabilité et de cohérence avec le domaine qui a été fixé, nous nous sommes orientés vers un autre moyen de stockage de cette énergie : la Station de Transfert d'Énergie par Pompage Solaire (μ -STEPsSol).

Le principe est simple, et n'a rien de nouveau puisqu'il est utilisé par exemple dans le barrage réversible de Grand'Maison. On dispose de deux cuves, l'une en point haut, l'autre en point bas. Lorsque l'énergie est manquante, on fait couler l'eau du point haut vers le point bas où elle passe dans une turbine, qui produit l'énergie qu'il nous manquait. À contrario, lorsque l'on dispose d'un surplus d'énergie, on pompe l'eau du point bas pour la réacheminer dans la cuve située en hauteur (*site de Capenergies*).

Ce procédé définit alors un nouveau type d'eau en circuit fermé sur le domaine : l'eau énergie – qui ne sert ni à irriguer, ni à l'usage domestique. Il a donc fallu dimensionner et choisir le parcours du circuit correspondant à partir des contraintes observées.

La première contrainte concerne la dimension des cuves : en choisissant les deux points extrêmes du domaine – respectivement à 75 mètres et 5 mètres d'altitude – nous sommes confrontés à une limite d'espace puisque La Maison de la Plage occupe déjà le point bas. De fait, après avoir effectué des mesures sur place, nous avons choisi de creuser 96 m^3 ($8 \times 6 \times 2$) sous la terrasse nord de l'édifice pour former une cuve qui accueillera l'eau. Puisque le circuit d'eau énergie est fermé, une capacité maximale de stockage est définie, correspondant à l'énergie potentielle de ce volume d'eau à une hauteur de 70 m : le calcul donne environ 18 kWh.

La seconde contrainte concerne l'utilisation énergétique du domaine. À la lumière des appels de puissance du domaine une fois la production PV retranchée, nous avons choisi une turbine de 7,5 kW (22 000 €) de puissance nominale, de rendement de 85%, et de débit optimal de $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ce choix résulte d'un compromis entre dimensions de la turbine, coûts et capacité de production.

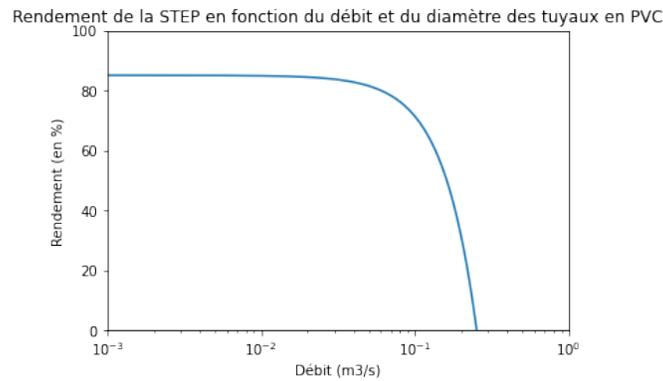


FIGURE 36 – Évolution du rendement de la μ -STEP en fonction du débit

La troisième contrainte provient des ingénieurs hydroélectriciens d'EDF qui affirment que la vitesse de l'eau dans les conduites ne doit pas excéder $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. On a ainsi pu choisir le diamètre des tuyaux, puisque $D = 2\sqrt{\frac{Q_v}{\pi v}} = 160 \text{ mm}$ pour le diamètre commercial.

Pour finir, la quatrième contrainte concerne le profil journalier de production/utilisation qui est plus diffus qu'il n'est concentré : globalement, le domaine est excédentaire en énergie « peu mais longtemps » plutôt que « beaucoup mais rapidement ». C'est pour cela qu'on a choisi une pompe avec une puissance du même ordre de grandeur que la turbine : on tire moins sur la production mais plus longtemps pour faire remonter l'eau. L'autre solution aurait été de surdimensionner la pompe pour puiser beaucoup d'énergie, mais sur un temps court. Ainsi, nous avons choisi une pompe de 10 kW (15 000 €).

À ce stade, le dimensionnement du système est terminé. Reste à définir le parcours de l'eau, c'est-à-dire cartographier les tranchées nécessaires à la mise en place du système.



FIGURE 37 – Schéma simplifié de la μ -STEP

La majeure contrainte dans ce travail a été paysagère : on imagine bien que dans ce jardin, on ne peut pas creuser des tranchées où l'on veut. Il faut penser toutes les installations en termes d'insertion paysagères, cf. le design du Belvédère qui accueillera la cuve haute de la STEP.

En effet, en raison des pertes de charge, le plus efficace aurait été de creuser une tranchée toute droite pour minimiser la distance et d'éventuels coudes. Cependant, il aurait fallu déraciner des arbres centenaires pour ce faire. C'est pour cela que nous avons choisi un circuit qui met à profit les chemins déjà existants, compromis entre intégration paysagère et minimisation des pertes de charge.

Enfin, nous avons dû choisir le matériau des tuyaux. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur l'Analyse du Cycle de Vie de ces produits, leur durabilité, leur résistance et leur efficacité. Ainsi, le PVC apparaît comme étant le meilleur candidat, devant le béton et la fonte : plus durable que le béton (100 ans contre 85 ans) et beaucoup plus écologique (18t CO_{2eq} contre quelques centaines de tonnes de CO_{2eq}), le PVC est aussi plus efficace car les pertes de charge sont moindres. Et même s'il est moins résistant, la pression dans les tuyaux n'excédant pas 7 bars, ils suffisent amplement (pression maximale de 10 bars). Les tuyaux en fonte, eux, ont été écartés car plus que deux fois plus cher que ceux en PVC (minimum une quarantaine d'euros le mètre). En conclusion, ces différentes contraintes ont permis de constituer le réseau d'eau énergie optimal dans notre cadre d'étude. Nous nous sommes aussi intéressés à calculer le rendement total du système en fonction du débit. Pour cela, nous avons pris en compte les pertes de charge (PVC, Ø160 mm) dans les conduites. Il a été étonnant de constater que la perte de charge au niveau d'un coude est complètement négligeable (facteur 100 à 1000 en fonction du rayon de courbure) par rapport à la perte de charge liée à la distance parcourue. Par ailleurs, l'effet de ces pertes de charge sur le rendement est très faible au débit de travail, et le rendement du système en turbinage est environ égal à celui de la turbine : on dispose donc d'un stockage total de 15 kWh correspondant à 2h de turbinage.

Toutefois, lorsqu'il a fallu chiffrer les coûts d'une telle installation, nous avons remarqué qu'elle était très peu rentable financièrement parlant. Avec un coût total de 275 000 € sans compter le Belvédère. À priori, il peut accueillir une cuve souple en plastique ou rigide en béton de 942 m³, l'incidence sur le prix étant variable en fonction du choix envisagé. Avec un prix du kWh de l'ordre de la dizaine de centime, il faudrait 180 000 utilisations pour rentabiliser la μ -STEPSol : à raison d'une à deux utilisations par jour, la rentabilité est assurée sur 250 à 500 ans... L'objectif serait alors double. D'une part, cette solution pourrait être utilisée comme un exemple pour les autres structures souhaitant se diriger vers une autonomie énergétique à base d'ENR, sur des terrains avec un dénivelé plus important. D'autre part, on pourrait aussi envisager de créer une installation beaucoup plus importante en coopération avec la ville de Cavalaire où l'on a observé une zone humide à 400 m d'altitude : c'est dans cette optique que le Belvédère a été surdimensionné, en plus de jouer le rôle de Château d'eau, centralisant l'eau nécessaire à l'irrigation du jardin.

En parallèle, il a fallu installer un stockage d'énergie sur batterie pour d'une part absorber les pics de tension, et d'autre part lisser le plan de tension. En ce qui concerne ces installations, deux technologies principales ont été envisagées : les batteries redox, ou batteries à circulation, et les batteries plus classiques, type lithium ion ou plomb. Les batteries à circulation sont un nouveau type de batterie utilisées dans le stockage de l'énergie photovoltaïque, la technologie la plus répandue étant la redox Vanadium, utilisant deux couples d'oxydes de vanadium. Si cette technologie semble sur le papier prometteuse, elle pose encore quelques problèmes dans sa mise en application.

En effet, la capacité massique de stockage reste encore relativement faible (même si le problème est mineur dans le cas d'une application de stockage non embarquée), mais surtout, elle utilise des espèces chimiques dangereuses pour la santé sous phase aqueuse, ce qui présente des problèmes d'un point de vue de la sécurité. Il est alors indispensable que la batterie ne connaisse pas de fuite, sans quoi une pollution chimique des sols a lieu.

Enfin, le caractère encore très (trop) récent de ce type de technologie nous a poussé à nous tourner vers des batteries de stockage plus traditionnelles. Dans les technologies existantes et commercialisées, on retrouve 2 concurrents intéressants : le Powerwall de Tesla pour sa capacité et la technologie Eaton de Nissan, qui propose des batteries recyclées. Pour satisfaire la volonté d'exemplarité environnementale du domaine, nous avons choisi la technologie Eaton.

Ce risque de fuite chimique se retrouve pour la plupart des méthodes de stockage par batterie, en particulier pour la pile à hydrogène. L'hydrogène étant l'élément le plus petit du tableau périodique, il peut en effet s'échapper par la moindre brèche, aussi petite soit-elle. De plus, le risque d'inflammabilité d'une nappe d'hydrogène en cas de fuite est très important : on considère que l'énergie requise pour l'inflammation est 10 fois moindre que pour le gaz naturel. Or le stockage des batteries se ferait à l'arrière du restaurant, dans une zone où les jardiniers s'occupent de divers travaux pouvant générer des étincelles. C'est pourquoi nous n'avons pas choisi de multiplier les batteries utilisées, mais de mettre en place cette μ -STEPSol. *lien pour le site "Connaissance des énergies"*

V-C2) *La tour pomme de pin*

Cette tour à eau permet le stockage de l'eau au point haut de la μ -STEP. Étant donné la quantité importante d'eau à stocker, on ne pouvait pas placer une grosse citerne en hauteur au milieu du paysage. Il a donc fallu tenir compte de l'impact paysager et designer une sorte de belvédère qui combine l'efficacité de stockage, le côté esthétique, et pédagogique (avec la *nano*-STEP qui sera une maquette présentée aux visiteurs pour leur expliquer le fonctionnement). Ce belvédère a plusieurs fonctions : sa fonction principale est le stockage de l'eau pour la μ -STEP (942 m³ de stockage) mais il a aussi pour but d'offrir un point de vue sur le domaine pour le visiteur. À ceci s'ajoute un usage pédagogique : la *nano*-STEP (maquette) permet d'expliquer le fonctionnement de la μ -STEP aux visiteurs qui viennent sur le belvédère. Enfin, cette tour à eau possède un côté esthétique (forme de pomme de pin) et poursuit l'héritage (lien avec le Cairn historique).

Pour rester dans la pensée de Gilles Clément, « la non dépense des énergies contraires », on a cherché à éviter un excès d'ornements pour rester dans une économie de moyens. On a cependant souhaité rester exemplaire, en pensant la résolution esthétique de ce belvédère pour montrer au visiteur le stockage de l'eau. On s'est posé la question de comment sensibiliser le visiteur au fait que c'est une citerne : montrer l'idée du partage de l'eau : redistribution de l'eau aux hommes (énergies) et aux végétaux (irrigation).

On s'est inspiré de la tour à eau de Gilles Clément en Ardèche ([lien de la page sur le site Ardèche actu.com](http://www.ardècheactu.com)) qui permet de recueillir l'eau de l'air à travers la condensation de la vapeur d'eau. Cette idée de tour a été reprise mais en forme de pomme de pin pour l'ancrer encore plus dans le domaine et montrer l'importance de l'eau sur le domaine : la pomme de pin a un côté symbolique : les végétaux subissant la sécheresse (représentés par la pomme de pin) ont besoin de cette eau recueillie par la tour à eau. Le côté pédagogique est aussi présent : on montre comment le mouvement de l'eau peut aussi fournir de l'énergie.



FIGURE 38 – La tour en pomme de pin

V-D) *Aspect général du système de gestion des eaux retenu*

Avant de dresser un bilan de cette partie, revenons rapidement sur le stockage des eaux : la technologie de μ -STEP que nous venons de présenter permettra de répondre en partie cette demande de stockage. Nous avons déjà présenté les installations permettant le stockage de l'eau de pluie récupérée. Les lagunes permettent aussi de stocker un volume conséquent d'eau (même si elle est usée). De plus l'on dispose déjà de plusieurs cuves réparties dans le jardin (pour un volume total de m³). On pourrait donc stocker jusqu'à . Cela semble satisfaisant, mais nous ne pouvons pas conclure définitivement car il nous manque des données sur la source principale du domaine (comme on l'a déjà mentionné plus haut tôt).

Nous pouvons maintenant combiner toutes les recherches précédemment effectuées pour les connecter entre elles et proposer des installations de gestion des eaux du domaine cohérentes entre elles. Le calque page suivante résume le réseau de gestion de l'eau retenu :

Nous avons bien sûr adopté ici une vision assez globale du système de gestion des eaux. Une vue plus précise nécessitera de plus amples données et la création d'un modèle complexe, aux paramètres trop nombreux pour cette étude primaire. Différentes solutions, comme les oyas (des pots en argile qui offrent une alternative plus économe en eau à l'arrosage traditionnel, dont le fonctionnement est détaillé en annexe page 49), pourront également intervenir dans ce nouveau système de gestion de l'eau.

Nous retiendrons aussi que les systèmes d'irrigation et de stockage (d'eau et d'énergie) sont intimement liés, et qu'ils sont à mettre en relation avec les sources d'énergie : les μ -STEP devront être intégrées au réseau énergétique. Nous pouvons donc enfin commencer à répondre à la demande énergétique du domaine.

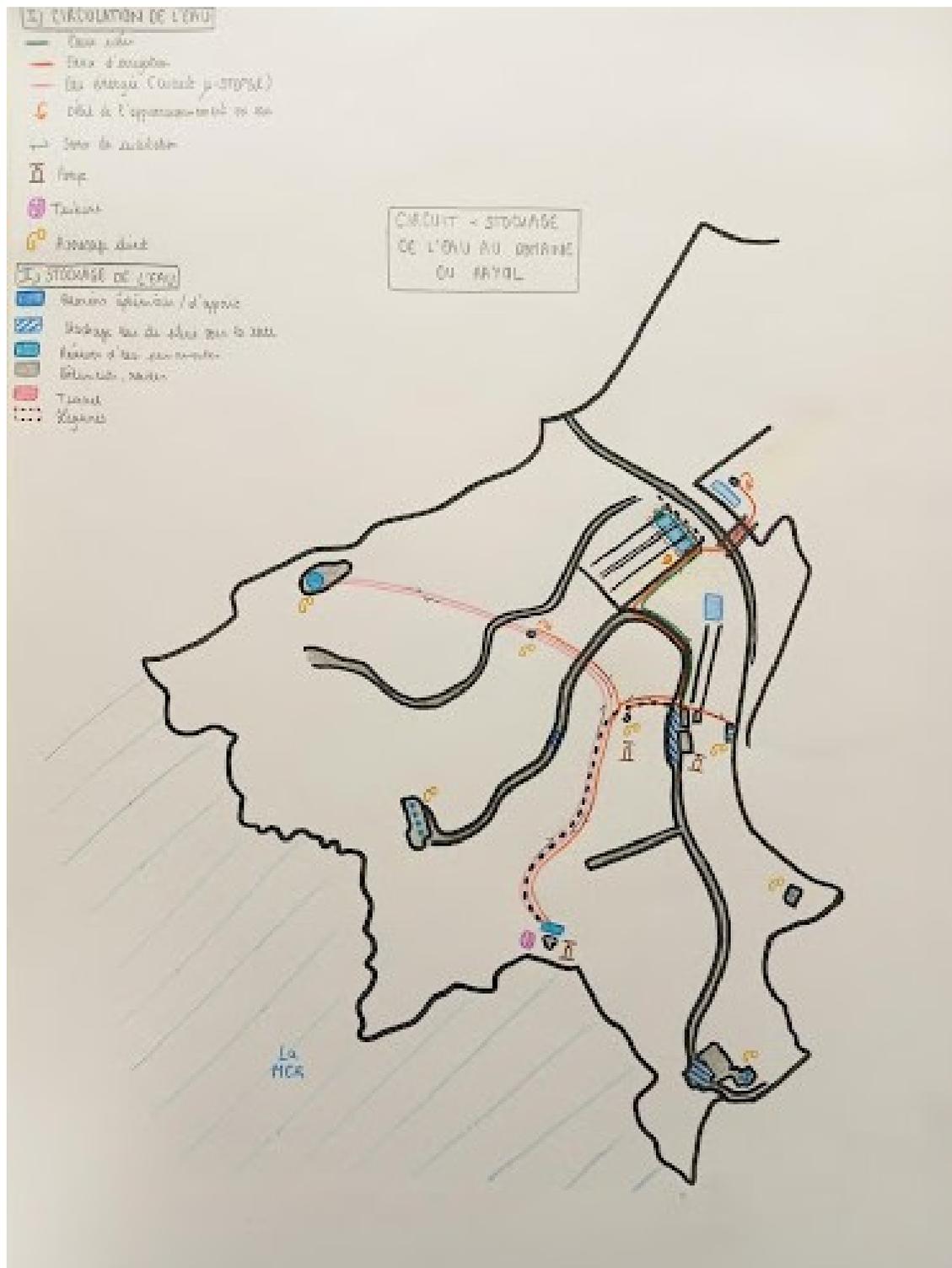


FIGURE 39 – Le réseau de gestion des eaux retenu

VI) Une vue globale sur les installations proposées

VI-A) Évaluation des installations proposées

L'analyse qui suit, qui concerne la production, la consommation ou encore le stockage des données (parties 1 à 3) a été réalisée à l'aide d'une librairie Python développée par Romain BESSEAU. Le code Python spécifique à l'analyse que nous avons proposée se base sur les fonctions de cette librairie.

1 — Production PV

On modélise la production d'énergie solaire que l'on obtiendra, en fonction de la puissance des installations que l'on veut installer, du ratio de performance de ses modules et de leur orientation. Pour cela, on récupère les données d'ensoleillement au Rayol sur plusieurs années (2005 à 2020) depuis CAMS Radiation (*site de Meteosat*). On établit une moyenne de la production que l'on aurait obtenu durant ces années pour modéliser la production future.

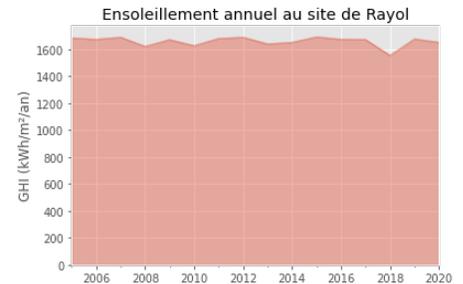


FIGURE 40 – Profils d'ensoleillement annuel au Rayol

2 — Consommation

Ne possédant que les profils de consommation par bâtiment pour quelques jours de l'année, on en tire un profil moyen, le profil journalier par bâtiment que l'on considère sur toute l'année.

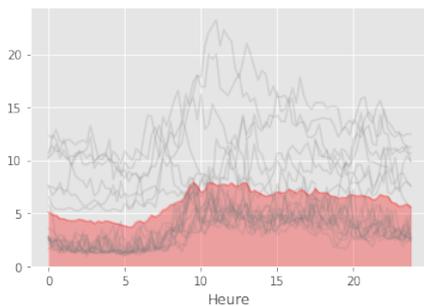


FIGURE 41 – Consommation Hdm

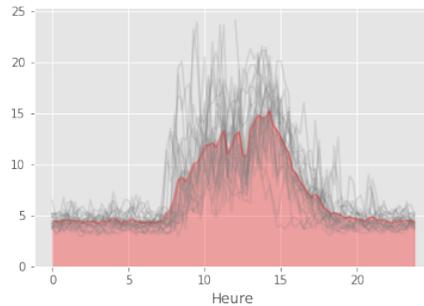


FIGURE 42 – Consommation cuisine

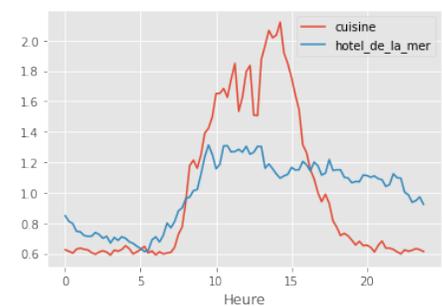


FIGURE 43 – Profils temporels

Pour modéliser la consommation sur chaque jour de l'année, on applique un coefficient à la consommation, fonction de la température comme décrit dans la partie « Puissance mensuelle », que l'on récupère à l'aide de MERRA-2.

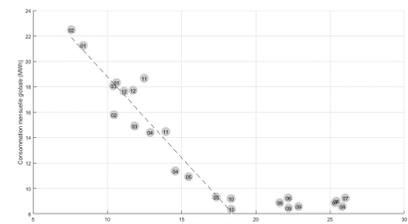


FIGURE 44 – Corrélation entre consommation et température

Appliquer ce coefficient à la consommation électrique du domaine au cours de l'année permet de trouver le profil de consommation électrique suivant (la partie production d'électricité en bleu dans le graphe est tracée avec une puissance d'installation quelconque, que l'on n'étudie pas ici) :

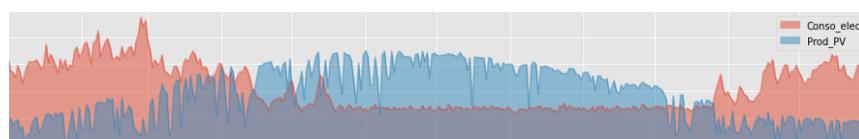


FIGURE 45 – Modélisation de la consommation électrique actuelle au cours de l'année

Les méthodes de chauffage proposées permettent de rendre la consommation électrique indépendante de la température. Ceci permet d'oublier le coefficient appliqué précédemment à la consommation en fonction de la température, et d'obtenir le profil de consommation suivant :

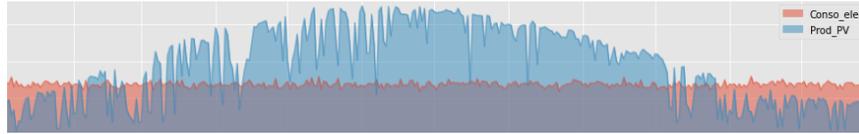


FIGURE 46 – Modélisation de la consommation électrique potentielle au cours de l'année

3 — Stockage

Pour comprendre l'efficacité du stockage, on regarde chaque jour la production d'énergie solaire - l'autoconsommation directe envisageable (durant la journée, la production solaire peut directement être consommée), - le stockage que l'on peut réaliser (fonction des capacités en puissance et énergie de notre système de stockage) - l'énergie stockée que l'on peut consommer quand on ne produit plus (la nuit, on consomme mais on ne produit pas). Faisant la différence consommation - (autoconsommation directe + indirecte), on connaît la demande réseau dont on a besoin, et faisant la différence production PV - (autoconsommation directe + indirecte), on connaît le surplus de production d'énergie solaire que l'on doit écriéter ou que l'on peut renvoyer dans le réseau.

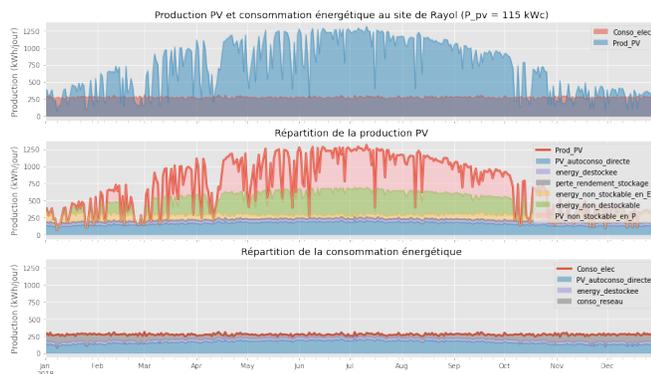


FIGURE 47 – Profils de consommation, production et stockage

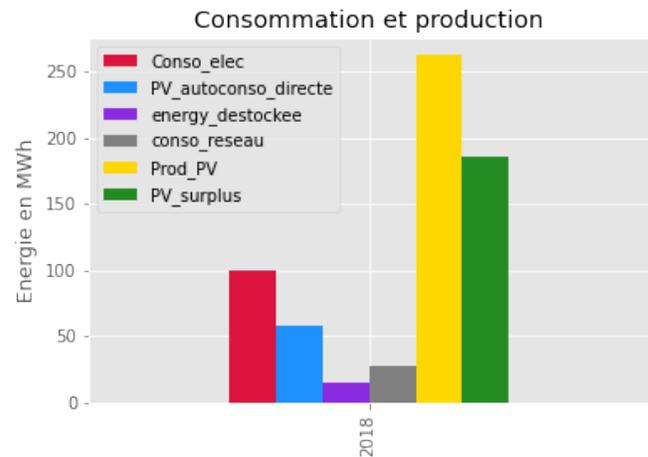


FIGURE 48 – Représentation en diagramme en barres

4 — Interprétation

Les graphiques présentés ci-dessus, sont adaptés au dimensionnement des installations que l'on propose, dans le cas d'une installation de panneaux solaires sur l'ensemble des surfaces étudiées. Nous pouvons disposer d'une STEP et de batteries qui fournissent un stockage en puissance de 46 kW, et en énergie de 55 kWh. Nous avons donc comme paramètres :

- Puissance photovoltaïque : 220 kWc
- Puissance stockage : 46 kW
- Énergie stockage : 55 kWh
- Rendement μ -STEP : 0,8

On remarque que quand le chauffage électrique est éliminé, une installation de cette dimension permet de produire sur l'année plus d'énergie que ce que le domaine consomme. Sur les 100 MWh consommés, environ 75 sont fournis par les panneaux, et il en reste 25 à tirer sur le réseau. On peut renvoyer sur le réseau environ 180 MWh. Le domaine est donc avec ce scénario, autonome en énergie électrique à 75%.

5 — Étude supplémentaire

Pour évaluer si le stockage que l'on propose pourrait être amélioré significativement, on trace l'évolution du stockage en énergie et puissance possible, en fonction du dimensionnement de notre stockage :

Ce graphique montre que la puissance de notre installation de stockage (46 kW) est très peu restreignante : la puissance du stockage le limite pour seulement 20% du temps. C'est ici la capacité du stockage qui le limite, pour 90% du temps.

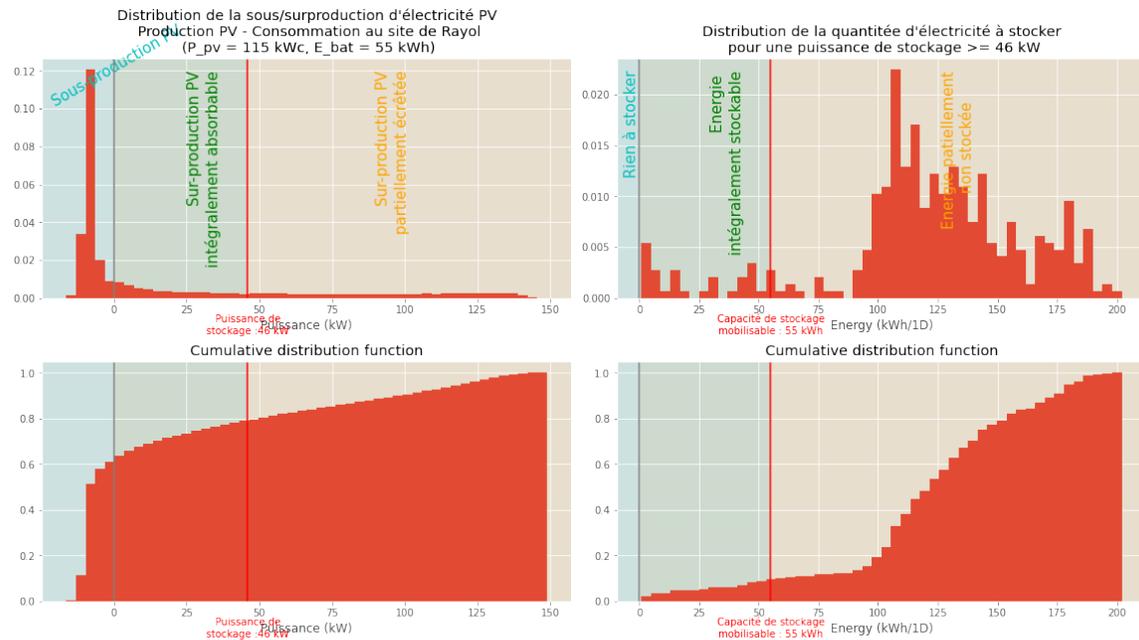


FIGURE 49 – Temps d'utilité du stockage en fonction de sa puissance et de sa capacité

Augmenter sa capacité de 55 à 90 kWh n'est pas très utile : on gagnerait environ 3% de temps de stockage. Il faudrait que la capacité de notre stockage dépasse les 100 kWh pour que l'augmentation de sa capacité ait un réel impact sur son temps d'utilisation.

Dans le cadre de notre projet, ce stockage est donc bien dimensionné : pour l'améliorer, il faudrait un investissement considérable qui ne semble pas être pertinent.

VI-B) Une solution qui se veut pédagogique

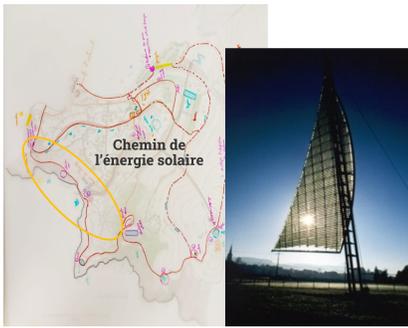
Les ressources à exploiter ont été présentées et quantifiées, et des solutions techniques pour les exploiter ont été étudiées. Pour rappel, la démarche de notre projet consiste à créer une partie pédagogique au sein du jardin, autour des énergies. Pour cela, nous avons imaginé un parcours pour les visiteurs permettant de présenter notre réflexion sur les énergies qui sont en lien avec le jardin.

On va tenter de faire ressentir dans cette partie ce que l'on a appelé le 'sentier des énergies', au cœur du jardin. Voici trois lignes directrices de cette proposition :

- cette partie du jardin vient accompagner la visite existante, et a pour vocation de montrer le rapport de l'homme à son environnement qui ne concerne pas que les plantes mais aussi la nécessité de l'énergie
- elle doit refléter la collaboration entre paysagistes et ingénieurs, mais également l'aide reçue des autres professions comme les jardiniers et artistes
- elle devra respecter une dimension pédagogique affirmée placée au cœur de ce sentier.

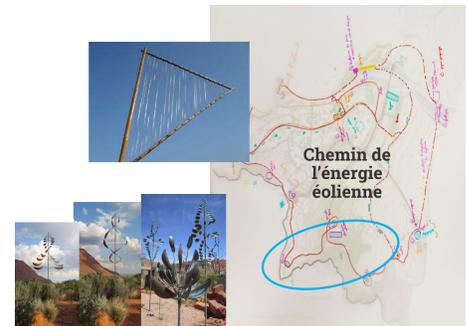
À l'heure actuelle, les visiteurs arrivent au parking. Celui-ci sera orné d'ombrières photovoltaïques, qui proposeront de l'ombre aux voitures, une récupération d'eau de pluie, et une production d'électricité. Cela permettra de signifier aux visiteurs qu'ils s'apprentent à visiter un jardin engagé dans l'énergie 'verte'. Ensuite, le visiteur entre dans le parc par l'Hôtel de la mer où, en complément de l'exposition sur le pyro-paysage, il pourra prendre connaissance d'une exposition sur la manière responsable de chauffer le bâtiment avec la pompe à chaleur ou le chauffage à biomasse suivant la solution retenue. En sortant de l'Hôtel de la mer, le visiteur pourra profiter de la vue actuelle sur la mer et le soleil qu'elle reflète. La terrasse sera ainsi un point important pour que le visiteur puisse ressentir les énergies qui sont présentes dans le jardin.





Ensuite, le visiteur sera amené à suivre le sentier qui longe la côte jusqu'à la Pointe du Figuier. Il ressentira sur ce sentier l'énergie solaire à travers plusieurs installations comme une voile qui capterait l'énergie solaire de manière artistique et intégrée au paysage, des miroirs qui pourraient réfléchir la lumière à différents endroits du parc, permettant par exemple d'éclairer des endroits habituellement sombres.

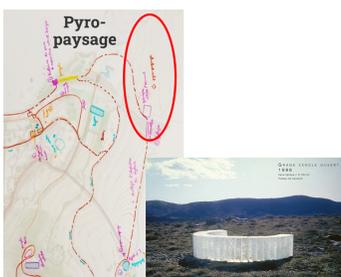
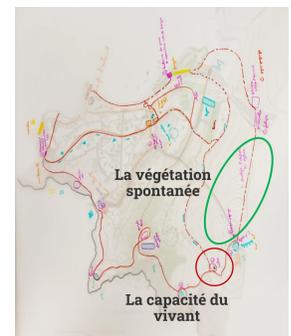
Une fois à la Pointe du Figuier, le visiteur montera jusqu'au point culminant du jardin qui s'élève à 70 m au-dessus de la mer. Il ressentira l'énergie éolienne que l'on a pu nous-même ressentir fortement lors de nos visites. Comme elle n'est pas présente de manière constante, il sera question d'en faire une représentation sensorielle. On peut alors imaginer des installations comme un moulin à vent ou une harpe dont la musique est issue de la seule force du vent.



Arrivé en haut, le visiteur se retrouvera sur le belvédère composé de la tour d'eau "pompe de pin" et d'une *nano-STEP*, modélisation de la μ -STEP à but éducatif. Plus bas, une autre tour d'eau dans la région Asie du jardin, serait constituée entièrement de bambou. Cette tour est utilisée par des peuples africains pour recueillir de l'eau pour alimenter les villages, ce qui donnera aux visiteurs une dimension de partage, de gestion de la ressource et de la rareté de l'eau dans certains territoires.



En partant du belvédère, le visiteur pourra emprunter un deuxième chemin, indépendant du précédent. Celui-ci mettra en lumière la végétation spontanée, c'est-à-dire la végétation qui naît sans que l'homme n'aménage le territoire. En effet, un des buts de Gilles Clément est de montrer que la végétation se débrouille très bien sans l'homme. La zone des ruches sera aménagée à but didactique pour montrer la véritable capacité de la faune à faire vivre les végétaux alentours et à s'en nourrir, avec la production de miel.

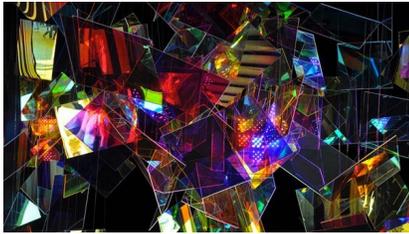


Au bout de ces deux chemins se situera le pyro-paysage que l'on peut observer le long de la route. Il retranscrit l'importance du feu dans cette zone, avec notamment le travail artistique de Bernard Dejonghe qui travaille sur la formation du verre : il utilise le feu pour modeler la matière de manière artistique. On sentira ainsi l'énergie du feu mais aussi l'énergie nécessaire pour le travail des matériaux.

Tout au long de ce chemin, le visiteur pourra remarquer la présence d'oayas dans le sol entre les plantes, dont l'étude est décrite précisément en annexe page 49. Ce sont de petits pots en terre cuite enfoncés dans le sol entre les plantes, qui visent à les approvisionner en eau sur de longues durées.

Pour exposer l'ensemble du projet, la maison à côté de la pergola de panneaux photovoltaïques sera transformée en "maison des énergies". Y seront exposées des œuvres artistiques en rapport avec l'énergie, ainsi qu'une présentation de notre projet pour montrer en quoi il accompagne le jardin dans sa transition vers une autre étape.

Le visiteur en sortant de la maison descendra pour retourner dans le jardin vers le 'restaurant des convergences'. Il représentera notamment la convergence des rayons solaires avec un Rawlemon, installation dont le fonctionnement est décrit en annexe page 49. En dehors de l'aspect purement décoratif de l'objet, celui-ci est parfois véritablement utilisé pour la production d'énergie solaire en faisant converger les rayons vers les panneaux solaires.



Pour terminer, en sortant de cette zone, de manière à mettre en lumière le renouvellement du vivant, le visiteur passera par l'espace de compostage avec son méthaniseur, dont le fonctionnement est décrit en annexe page 50. L'idée est de sensibiliser le visiteur à ce renouvellement du vivant et au compostage, puisque le méthaniseur peut être utilisé de manière domestique.

Ainsi, le visiteur profitera tout au long de ce parcours, d'un apprentissage au croisement des disciplines entre ingénierie, paysage et art.



VII) Conclusion

En conclusion, ce rapport vise à démontrer en quoi l'implantation de nouveaux moyens de production au sein du domaine a impliqué pour notre groupe une réflexion sur plusieurs niveaux.

D'abord, une analyse des besoins énergétiques et des ressources disponibles au sein du domaine nous ont permis d'avoir une vision globale du problème et d'apprécier les difficultés à aborder. De ces études sont ressortis le fort potentiel pour l'énergie photovoltaïque du domaine, ainsi qu'une concentration de la consommation sur le restaurant et l'Hôtel de la mer. La prise en compte du décalage entre la demande et la production énergétique nous a également conduit à penser un système de stockage de l'énergie, la μ -STEP, dimensionnée en accord avec les ordres de grandeurs de flux d'énergie sur le domaine.

De plus, il est apparu que l'ajout de panneaux photovoltaïques était incompatible avec le réseau électrique actuel, et notre groupe a à cet effet proposé des solutions possibles, pour éviter par exemple les surtensions.

Enfin, notre groupe a dû réfléchir au vœu d'exemplarité environnementale formulé par l'association du domaine. Pour s'adapter à la philosophie de ce jardin unique, nous avons travaillé, en collaboration avec une équipe de paysagistes, à l'élaboration d'un parcours pédagogique pour les visiteurs. Nos propositions se concentrent sur l'ajout d'installations artistiques, en lien avec l'énergie, mais nous avons aussi pensé à l'aspect esthétique des installations directement utiles pour la production, ou le stockage.

Ainsi, notre travail au sein du domaine a mêlé de multiples dimensions : de l'ingénierie, du paysagisme ou encore de la pédagogie. En complément de ce rapport, nous remettons à l'association du domaine un ensemble de fiches actions, qui détaillent l'ensemble des installations envisagées pour permettre au domaine de se projeter et d'explorer la mise en place concrète des différentes solutions étudiées au fil de ce rapport.

Annexes

Calcul de la puissance de l'installation de chauffage

Pour calculer la puissance de notre installation de chauffage, on calcule les déperditions pour chaque pièce par ses parois. Ceci nous permet de dimensionner la puissance de l'installation : élément central de chauffage et chacun des radiateurs dans chaque pièce. Les déperditions sont calculées pour la température minimale de l'année sur quelques jours qui, au Rayol, est de $T_{min} = 3^{\circ}\text{C}$. La température intérieure voulue sera de $T_{int} = 22^{\circ}\text{C}$, après communication avec les utilisateurs du bâtiment.

Calcul des déperditions par les surfaces planes :

Les murs extérieurs du bâtiment sont en pierre : on considère une conductivité thermique λ_{ext} de $1,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Les murs intérieurs sont en brique : $\lambda_{int} = 0,84 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Pour les fenêtres en simple vitrage actuelles, on prend $\lambda_1 = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une épaisseur $e = 5 \text{ mm}$.

Pour le double-vitrage futur, on prend $\lambda_2 = 0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $e = 14 \text{ mm}$.

Ces valeurs donnent des coefficients U respectivement de $5,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $1,9 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. On obtient les coefficients U avec la formule $U = \frac{1}{R}$, où R est la résistance thermique, obtenue avec la formule $R = \frac{e}{\lambda} + 0,17$ (en $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$). Le terme additif correspond à la "résistance superficielle", due aux mouvements conducto-conductifs.

La déperdition thermique d'une surface est alors $U \times \Delta T \times S$, où S est la surface en m^2 et ΔT la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur (qui peut être l'air, le sol, une cave non chauffée,... Dans tous les cas, on prend la température minimale de cet extérieur au cours de l'année, qui n'est pas forcément de 3°C).

Calcul des déperditions par les ponts thermiques :

Pour calculer les déperditions au niveau thermique P_{ponts} , on dispose de la formule

$$P_{ponts} = L \times \psi \times \Delta T$$

où L est la longueur du pont thermique, ΔT est la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, et ψ un coefficient qui dépend du type de pont thermique, que l'on peut trouver dans le tableau ci-dessous.

Exemple 1 : Bâtiment de plein pied				
	Longueur du Pont thermique	Bâtiment Non Isolé	Bâtiment avec Isolation par l'extérieure	Bâtiment avec Isolation par l'intérieure
Liaisons Plancher Bas / Murs	40 m	$\psi = 0,31$	$\psi = 0,56$	$\psi = 0,09$
Liaisons Plancher Haut / Murs	40 m	$\psi = 0,05$	$\psi = 0,10$	$\psi = 0,05$
Liaisons Murs / Murs	10 m	$\psi = 0,14$	$\psi = 0,15$	$\psi = 0,03$
Liaisons Menuiseries / Murs	35 m	$\psi = 0,33$	$\psi = 0,05$	$\psi = 0,05$

Liaisons Plancher Bas / Murs	30 m	$\psi = 0,31$	$\psi = 0,56$	$\psi = 0,09$
Liaisons Plancher Int. / Murs	30 m	$\psi = 0,67$	$\psi = 0,07$	$\psi = 0,76$
Liaisons Plancher Haut / Murs	30 m	$\psi = 0,05$	$\psi = 0,10$	$\psi = 0,05$
Liaisons Murs / Murs	20 m	$\psi = 0,14$	$\psi = 0,15$	$\psi = 0,03$
Liaisons Menuiseries / Murs	35 m	$\psi = 0,33$	$\psi = 0,05$	$\psi = 0,05$

FIGURE 50 – Coefficients ψ pour les différents ponts existant au rez-de-chaussée (à gauche) et aux étages (à droite)

Calcul des déperditions totales :

Pour calculer les déperditions thermiques de chaque pièce, on somme les déperditions par les surfaces planes, et par les ponts thermiques. Cela nous permet de dimensionner la puissance nécessaire de chaque radiateur dans chaque pièce. Enfin, pour calculer les déperditions de l'ensemble du bâtiment, on somme les déperditions par pièce, ce qui permet de dimensionner l'installation de chauffage.

Fiches techniques des méthodes de chauffage et méthodes éliminées

Solutions éliminées :

- **PAC air-air** : Le prix des travaux est trop important puisqu'il est nécessaire d'installer des cassettes de soufflage dans tous les locaux qui nécessitent un moyen de chauffage, qui coûtent très cher.
- **PAC géothermique** : Nécessité de creuser le sol, soit pour y faire passer un serpentín à 2 m de profondeur sur une grande surface, soit pour faire un forage d'une trentaine de mètres de profondeur.
- **Panneaux solaires thermiques** : Le branchement des modules implique de la plomberie avec des liquides caloporteurs mauvais pour l'environnement. Le montage est difficilement modulable, ce qui donne lieu à des soucis de régulation : le réseau fermé peut être amené à surchauffer

Première méthode retenue : chauffage par chaudière à bois

Installer une chaudière peut être une solution intéressante pour chauffer les bâtiments, en mettant à profit le fort potentiel du jardin en terme de biomasse. Le bois est gratuit et abondant et la chaudière permet d'avoir un chauffage central contrairement au poêle à bois. Cependant cela nécessite de recharger les bûches jusqu'à deux fois par jour en hiver.

Comme un très grande partie de la consommation électrique du domaine provient du chauffage des bâtiments, la chaudière représente un véritable levier d'action pour agir sur l'exemplarité et l'autoconsommation du domaine. On dispose sur le domaine de 70 à 100 m³ de bûches pouvant être exploitées pour chauffer (c.f. document Estimation de la quantité de déchets produite au sein du domaine du Rayol), principalement de l'eucalyptus, et en plus petites proportions de l'arbousier et du chêne (vert, liège). Le potentiel thermique de ces bûches peut alors s'élever de 120 à 160 MWh thermiques annuels. Si on soustrait à la consommation totale du domaine celle du restaurant en été, on tombe aux alentours des 50 MWh. Si on ajoute le fait que l'hôtel de la mer sera mieux isolé et le fait que cette électricité ne part pas uniquement dans le chauffage, le domaine a amplement la ressource en bois pour se chauffer avec la solution chaudière.

Seconde méthode retenue : PAC air-eau (aérothermie)

L'aérothermie permet de produire de la chaleur pour le chauffage et le chauffage d'eau sanitaire en prélevant les calories de l'air extérieur. Le système peut également fonctionner comme climatisation. Le système fonctionne jusqu'à -7°C/-20°C, un système d'appoint est intégré pour pallier au manque de puissance lors de faibles températures. Aucun travaux importants ne sont nécessaires (pas de forage), 2 jours d'installation. Le module extérieur est composé d'un ventilateur, le module intérieur est de la taille d'un frigidaire.

Pour une PAC air/eau, le raccord à une chaudière existante est possible, ainsi qu'un chauffage d'eau sanitaire. Pour une PAC air/air, plus facile à installer (et moins cher) s'il n'y a pas déjà un circuit d'eau et fonctionne aussi en clim, il faut une unité intérieure par pièce. Faible bruit au niveau du module extérieur (entre un frigidaire et une conversation calme). Il est préférable de placer l'unité extérieure dans une zone éloignée de fenêtres surtout pour le voisinage qui n'est pas climatisé.

On donne ci-dessous le détail des calculs pour la durée d'amortissement des solutions de chauffage :

- *Chaudière à bois* : La durée de vie de la machine va de 15 à 25 ans et le réseau d'eau est installé à vie. Le coût d'installation de l'ensemble avoisine 60 000 €. L'entretien demande 2 ramonages par an par un professionnel (250 €) et un changement de la chaudière tous les 25 ans (10 000 € de pose). L'installation est donc amortie en 10 ans.
- *PAC air-eau* : La durée de vie est semblable à celle de la chaudière, le coût d'installation de l'ensemble de l'installation avoisine 90 000 €. L'entretien demande une révision par an par un professionnel (250 €) et un changement de la machine tous les 15 ans (40 000 €). Le rendement étant de 0,66, on économise $6200 \times 0,66 \simeq 4100$ € par an. Au bout des 15 ans de vie de la première installation, on a dépensé $90000 + 15 \times 250 = 94000$ €, et économisé $4100 \times 15 = 61500$ €, résultant en un malus d'environ 30 000 €. Il faut ensuite changer l'installation, ce qui coûte 40 000 €, et au bout de 15 ans on économise à nouveau 60 000 €. Le malus résultant reste de 10 000 €. Finalement, l'installation est amortie après de plus de 40 ans.

On détaille également l'impact environnemental des deux solutions :

- En France, la production d'électricité émet entre 50 et 80g de CO₂ par kWh électrique, selon RTE et l'OCDE : on prendra 50 g, le cas le plus favorable. L'énergie consommée par le chauffage en 2019 était de 47 MWh. Cela fait donc une production de $50 \times 47 \times 10^3 = 2\,350$ kg de CO₂.
- La masse totale du réseau d'eau en tuyaux et radiateurs est de 10 tonnes, soit équivalent à 50 tonnes de CO₂ libéré pour sa fabrication.

- Chaudière : - ADEME : "Les émissions de gaz à effet de serre d'un appareil labellisé Flamme Verte sont environ 15 fois moins importantes que celles d'un chauffage fonctionnant au fioul" - le bois que l'on brûle est de toute façon déjà brûlé, donc la libération de CO_2 correspondante peut ne pas être prise en compte. La machine elle-même est composée presque exclusivement de métaux conducteurs, donc on considère 5 kg de CO_{2eq} par kilogramme de chaudière. Notre chaudière ferait aux alentours de 800 kg, donc pour la fabriquer, on aura libéré $800 \times 5 = 4000$ kg de CO_{2eq} , soit pour le chauffage avec chaudière : 54 tonnes CO_{2eq} .
Le système compense l'empreinte carbone de sa fabrication en **23 ans**.
- PAC : On économise au moins 2/3 de l'électricité consommée pour le chauffage, soit 1,6 tonnes de $\text{CO}_2 \cdot \text{an}^{-1}$. La machine est en plastique, dont on ne connaît pas la masse ni l'équivalent CO_2 . Considérant que le CO_2 pour la fabriquer est similaire à celui pour fabriquer la chaudière, on a donc 4 tonnes de CO_2 , soit le système au total : 54 tonnes CO_{2eq} .
Le système compense l'empreinte carbone de sa fabrication en **34 ans**.

Détails de la démarche ayant permis de dresser les profils temporel en puissance éolienne

Pour nos calculs, nous nous sommes basés sur un modèle d'éolienne verticale (VisionAir3) et horizontale (Bornay13+) dont les graphes $P_{produite}(v_{vent})$ sont représentés ci-dessous :

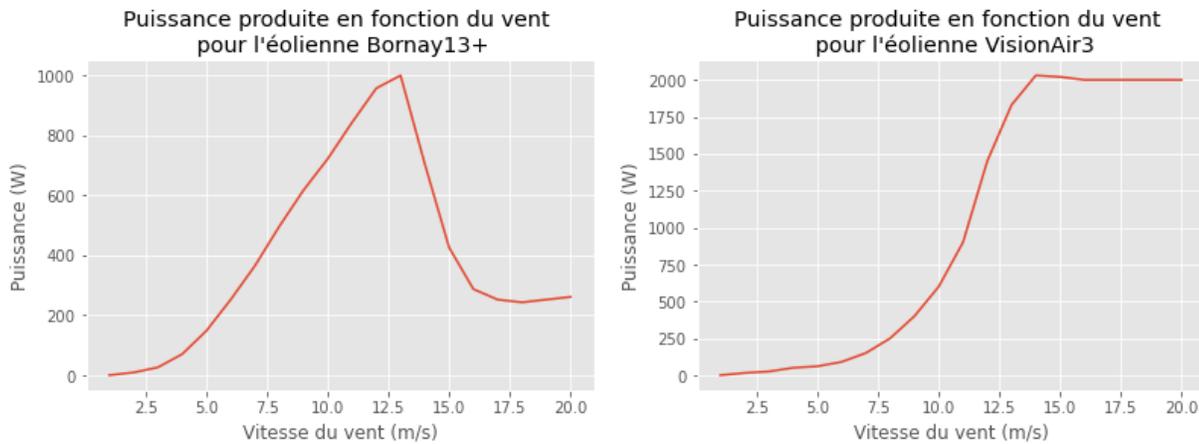


FIGURE 51 – Puissance produite par VisisonAir3 (à droite) et Bornay 13+ (à gauche) en fonction de la vitesse du vent. On retiendra la vitesse de mise en marche (3 m.s^{-1}) et leur puissance nominale

Pour les vitesses de vents au niveau du domaine, on utilisera les données de la base MERRA-2 (enregistrées entre 2000 et 2021). On notera que la base de données MERRA-2 discrétise le territoire avec une résolution de l'ordre de 10 km, et que donc elle fournit la valeur moyenne du vent sur l'ensemble du domaine. On peut vérifier la cohérence du modèle avec les quatre mois de mesures dont nous disposons :

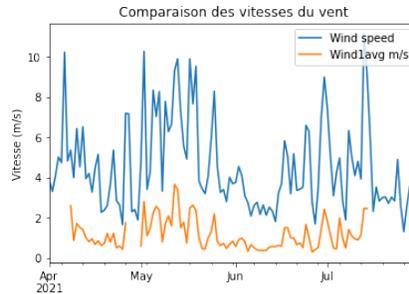


FIGURE 52 – Comparaison des vitesses de vent : données MERRA-2 (en bleu) et mesure devant l'Hôtel de la mer (en orange)

On constate que les deux vitesses de vent correspondent bien en termes de variations au cours du temps, et le graphique ci-dessous confirme la corrélation entre les données MERRA-2 et les mesures sur site :

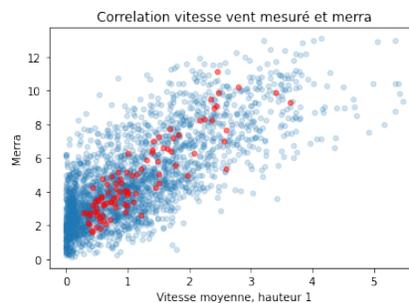


FIGURE 53 – Corrélation entre la vitesse du vent mesurée et les données MERRA-2 : ces deux données sont liées de manière satisfaisante

On utilise donc par la suite uniquement les données MERRA-2 pour étudier la distribution de vent et la production électrique associée. Il s'agit d'une hypothèse optimiste puisque les vitesses de vent du modèle sont plus proches de la vitesse optimale pour la production électrique que les vitesses mesurées.

Notons que le tracé de profils journaliers n'est pas pertinent dans le cas de la production éolienne car la vitesse du vent est trop variable d'un jour à l'autre, et n'est pas forcément corrélée à l'heure de la journée.

L'étude statistique sur les 20 dernières années de la distribution de la vitesse du vent et de la production électrique associée pour les deux éoliennes montre d'une part que, même avec les données du modèle MERRA-2, les vitesses de vent les plus fréquentes sur le site sont inférieures à la vitesse optimale pour ces éoliennes et parfois même à la vitesse de démarrage de l'éolienne (représentée par la limite en pointillés bleus sur les graphiques de distribution de vitesse du vent) ; et, d'autre part, que le facteur de charge de ces éoliennes est inférieur à 15% au moins 50% du temps.

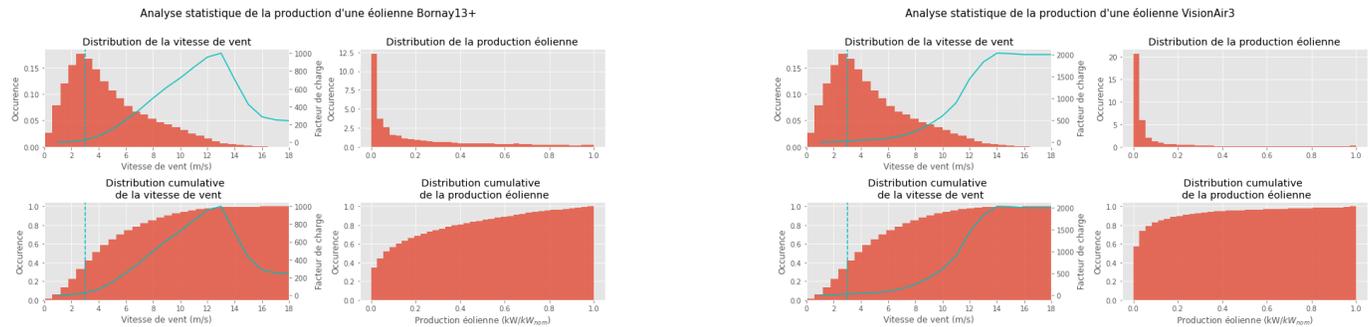


FIGURE 54 – Distribution de la vitesse du vent et de la production électrique associée pour les deux éoliennes étudiées

On obtient les conclusions exposées plus tôt dans ce rapport qui nous ont amenés à rejeter définitivement l'éolien pour assurer l'approvisionnement énergétique du domaine. En effet, la distribution du facteur de charge est encore moins probante avec les données mesurées qu'avec les données du modèle MERRA.

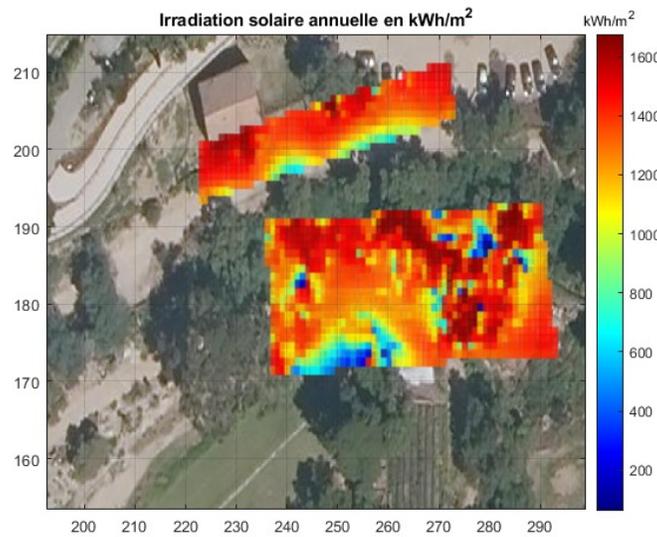
Évaluation du potentiel photovoltaïque d'une surface

FIGURE 55 – Énergie reçue au niveau du compost et du nord du verger

Les données de rayonnement solaire issues du satellite Meteosat (utilisant le service CAMS Radiation déjà cité), couplées à l'algorithme Heliosat-4 développé par le centre OIE de l'École des Mines de Paris, permettent une analyse de l'ensoleillement fine d'une surface donnée. Ici, cette cartographie du rayonnement solaire reçu au niveau du nord du verger permet de repérer les zones propices à l'installation de panneaux photovoltaïques.

Analyse de cycle de vie des installations photovoltaïques
Calcul du LCOE

Le LCOE (Levelized Cost of Energy) donne le coût de revient au kWh d'une installation. Pour le calculer, on considère les valeurs suivantes :

- CAPEX (Capital Expenditure = coût d'investissement pour l'installation en euro/kWc) de 2000, qui correspond à celui d'une installation de panneaux solaires pour particulier
- OPEX (Operational Expenditure = coût de la maintenance, frais divers en euro/kWc) de 40 chaque année
- Taux d'actualisation (taux d'intérêt effectif) r de 0,04
- Production annuelle de 1400 kWh/kWc (elle est plus grande en début de vie du panneau, puis plus faible en fin de vie, c'est une moyenne)
- Durée de vie des panneaux de 30 ans
- Part de production auto-consommée : 60/260 (en MWh)

On connaît le prix des dépenses lors de l'année t avec la formule $\frac{CAPEX+OPEX}{(1+r)^t}$, où r est le taux d'actualisation. De même, on connaît la production monétaire actualisée chaque année avec la formule $\frac{production}{(1+r)^t}$.

On suppose une panne sur les onduleurs au bout de 12 ans, qui coûte 200 CAPEX. Cette année-là, le prix de l'installation est donc de $\frac{200+40}{(1+0,04)^{12}}$ euro/kWc.

Le LCOE se calcule avec la formule : $\frac{\sum \text{coût actualisé}}{\sum \text{production actualisée}}$. On trouve 0,113 ce qui veut dire que l'électricité que l'installation produira reviendra à 11,3 centimes/kWh, alors que le prix actuel est de 15 centimes/kWh.

Empreinte carbone

Une analyse de cycle de vie d'une installation photo-voltaïque qui considère la fabrication des panneaux, câbles, onduleurs, etc et leur transport jusqu'à leur recyclage permet de calculer que l'électricité produite par cette installation émet 730 à 1160 kg CO_{2,eq}/kWc, en fonction du mix énergétique avec lequel sont produites ces installations.

L'installation produit 1 400 kWh/kWc d'électricité annuelle permet sur sa durée de vie de 30 ans de produire 1 400 × 30 kWh/kWc.

Finalement, l'impact environnemental de l'électricité produite par cette installation se situe entre $\frac{730}{1400 \times 30}$ et $\frac{1160}{1400 \times 30}$ kg CO_{2,eq}/kWh, soit entre 17 et 28 g CO_{2,eq}/kWh en fonction du mix énergétique utilisé pour la production et la mise en place de l'installation.

A titre de comparaison, l'électricité produite en France actuellement émet entre 50 et 80 gCO_{2,eq}/kWh grâce à sa production nucléaire. En Europe, l'électricité émet 400 gCO_{2,eq}/kWh.

Empreinte énergie

De la même manière, une analyse de cycle de vie permet d'établir que l'installation photovoltaïque a un coût en énergie primaire de 400 kWh Ep/kWc i.e. chaque kWc installé a consommé 400 kWh d'énergie primaire de sa création à sa mise en place.

L'installation ayant une production électrique de 1 400 kWh/kWc.an, donc en $\frac{4000}{1400} = 2,85$ soit environ 3 ans, la dépense d'énergie d'installation est compensée.

De plus, l'énergie électrique produite sur le domaine est de type "énergie finale". Pour passer en énergie primaire, le coefficient couramment utilisé dans le bâtiment est 2,58 : énergie primaire = 2,58 × énergie finale. L'installation produit donc 1400 × 2,58 = 3 600 kWh/kWc.an d'énergie primaire. Finalement, la dépense en énergie primaire pour l'installation est compensée en $\frac{4000}{3600} = 1,11$ ans soit 14 mois.

Intégration des installations photovoltaïques au paysage

Nous passons ici en revue les différentes intégration prévues pour les divers sites d'installations photovoltaïques :

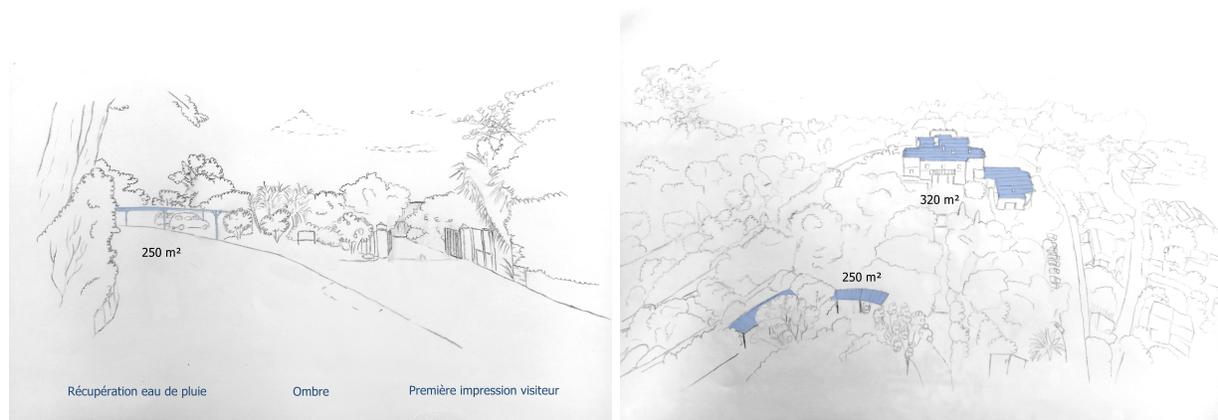


FIGURE 56 – Le parking de l'hôtel : montre le nouvel esprit dès l'entrée dans le jardin

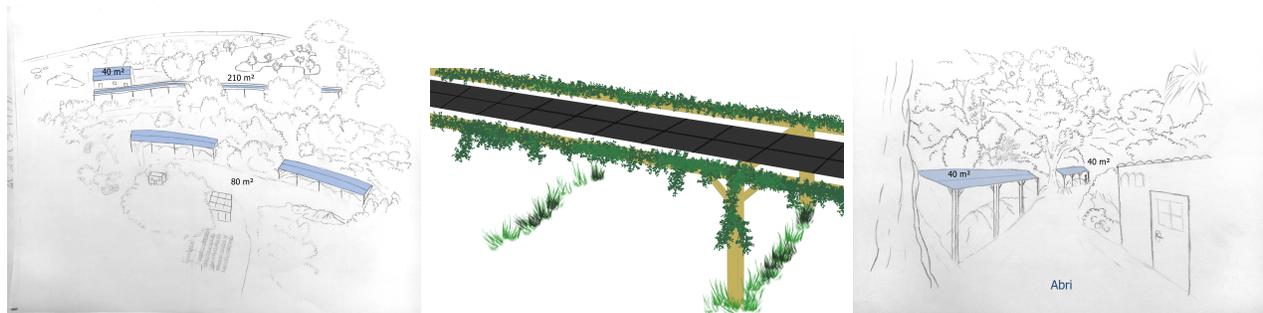


FIGURE 57 – La pergola du parking et la zone technique : tout en discrétion

L'implantation des panneaux solaires peut également être favorisée par l'utilisation de panneaux colorés. Néanmoins, bien que ceux-ci rendent l'installation plus esthétique, leur coloration ne leur permet pas d'absorber toutes les radiations du rayonnement. Le tableau ci-dessous évalue l'efficacité de panneaux colorés en fonction de leur couleur.

Filtre	Tension maximale (V)	Intensité maximale (A)	Puissance maximale (W)
Sans filtre	19,04	2,4	45,32
Filtre bleu	18,7	1,86	32,64
Filtre jaune	18,4	2,45	43,35
Filtre vert	17,49	1,57	27,07
Filtre rouge	18,2	2,01	35,94
Filtre magenta	18,6	2,45	45,31

L'entreprise Kameleon propose des panneaux solaires à un prix d'environ 409 \$, pour une efficacité réduite de 15% par rapport à des panneaux classiques.

Description des deux principales sources d'eau du domaine

Quelques connaissances géologiques préalables : il existe trois catégories de roches. Les roches sédimentaires, magmatiques (plutoniques : refroidissement lent en profondeur formant de gros cristaux et matériaux visqueux et volcaniques : refroidissement rapide en surface donc formation de pâte et matériau moins visqueux) et métamorphiques (roches transformées par conditions de pression et de température). Les observations effectuées sur le terrain témoignent de la présence de roches métamorphiques de type gneiss et micaschistes. Les gneiss sont facilement reconnaissables par la présence d'« yeux » de quartz. Les micaschistes se distinguent par la présence de cristaux de mica qui scintillent au soleil.



FIGURE 58 – Photo d'un micaschiste et d'un gneiss

A noter que ce type de roche correspond généralement à des aquifères de type « fissurés », c'est-à-dire que l'eau de pluie qui s'infiltré dans la roche va s'écouler préférentiellement à travers les fissures et les fractures. Par conséquent il est très important de pouvoir caractériser la fracturation de la roche (densité, direction, pendage...).

Description de la source et de son environnement : la source se situe au Nord de la voie verte qui traverse le domaine. La topographie est marquée par un vallon constitué de deux talwegs séparés d'un petit bombement. La source est implantée au niveau du talweg le plus à l'Est. Le talweg situé plus à l'ouest correspond à l'axe préférentiel d'évacuation des eaux de pluie et draine l'ensemble du vallon au-delà même des limites de propriété du domaine du Rayol. Le captage de la source correspond à une galerie maçonnée qui s'enfonce d'environ 15 mètres dans le versant.



FIGURE 59 – Photos de la source, avec et sans écoulements

D'après les observations réalisées dans le captage, l'ouvrage semblerait avoir été construit en deux temps : la première étape a d'abord consisté à creuser horizontalement une tranchée pour atteindre la roche mère. Mais comme la source devait s'assécher ponctuellement le fond du captage a été approfondi à la verticale pour aménager un petit bassin de décantation (dimension : 4 m de profondeur avec un diamètre de 0,7 m). C'est dans ce bassin de décantation qu'a été positionné un capteur pression/température qui a permis d'enregistrer les variations du niveau et de la température de l'eau entre le 22/11/2021 et le 29/11/2021. Les résultats obtenus sont décrits dans la suite de cette note.

Au fond de la galerie il est possible d'observer la roche mère et les plans de schistosité qui la constituent. Il est également possible de localiser trois principaux « griffons » d'eau (point d'écoulement) qui constituent le débit de la source :

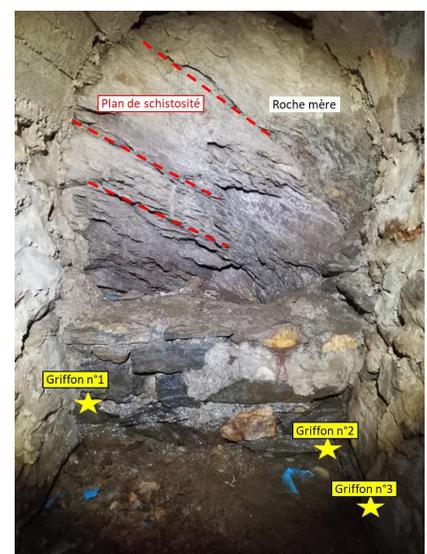


FIGURE 60 – Photo de l'intérieur du captage

Il est important de rappeler qu'à l'origine de la création des jardins du Rayol cette source assurait à elle seule les besoins en irrigation. À ce titre il apparaît important de pouvoir (ré)exploiter la ressource actuellement disponible.

Le puits de Chine est un puits en pierre d'une profondeur de 9 mètres environ et d'un diamètre de 3 mètres environ. Le diamètre de ce puits est particulièrement important compte tenu de la nature de la roche (très dure). Il ne s'agit très certainement pas d'un puits ancien mais plutôt d'un ouvrage ornemental visant à rendre l'endroit plus authentique. Il est donc fort probable que ce ne soit pas un puits mais une sorte de bassin tampon des eaux de ruissellement. Ces hypothèses semblent être confirmées par le responsable des jardins qui nous a informé que ce puits était alimenté par le vallon situé à quelques mètres. Lorsque l'eau monte dans le vallon (lors de fortes précipitations), une conduite permet d'acheminer l'eau dans le puits. Cette conduite sert également de « trop-plein » du puits lorsque l'eau dans le vallon diminue. Le puits est également équipé d'une pompe de relevage qui permet de rejeter l'eau à une centaine de mètres en amont du puits dans le vallon pour créer un circuit fermé. Cela permet de créer un écoulement d'eau artificiel dans le vallon.



FIGURE 61 – Photos du puits de Chine

À noter que ce puits pourrait être également alimenté par des arrivées d'eau souterraines. Mais pour vérifier cette hypothèse il faudrait pouvoir assécher le puits en période de basses eaux (absence de ruissellement dans le vallon) et suivre l'évolution du niveau dans le puits. Si une montée du niveau d'eau était observée cela confirmerait l'alimentation partielle du puits par des écoulements souterrains.

Mécanique des fluides au niveau des lagunes

On étudie les écoulements au niveau des bassins présentés précédemment. Nous introduisons les grandeurs en jeu dans le schéma ci-dessous :

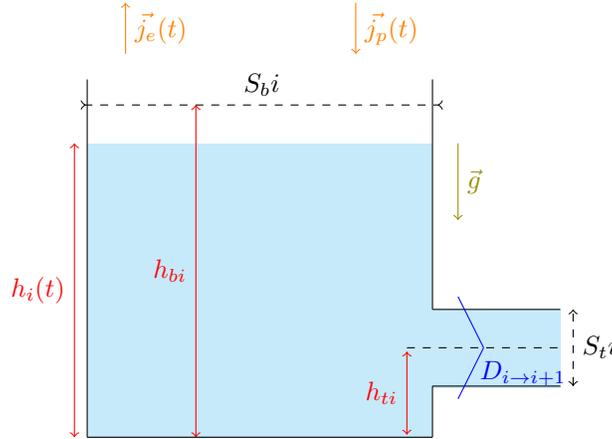


FIGURE 62 – Schéma simplifié de nos lagunes : la lagune indiquée i et le système global. Introduction des grandeurs caractéristiques en jeu

L'indice i correspond au numéro du bassin considéré. h_{bi} est le niveau maximum d'eau dans le bassin, S_{bi} et S_{ti} sont les sections du bassin et de la conduite respectivement, $\vec{j}_e(t)$ et $\vec{j}_p(t)$ sont les flux d'évaporation et de pluie, exprimés en $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ et enfin les $D_{k \rightarrow k+1}$ sont les débits volumiques d'eau en sortie du bassin k vers le bassin $k+1$.

On étudie l'évolution temporelle de la grandeur $h_i(t)$, le niveau du bassin i à tout instant.

Par bilan de masse par bassin, on obtient :

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{1}{S_{bi}} (D_{i-1 \rightarrow i}(t) dt - D_{i \rightarrow i+1}(t) dt) + \frac{1}{\rho} (j_p(t) dt - j_e(t) dt)$$

On va maintenant essayer d'approximer les quantités $D_{i \rightarrow i+1}(t)$. En supposant que l'on travaille avec un fluide parfait, et que l'on a un écoulement quasi-stationnaire et irrationnel, on applique les équations de Bernoulli (on ne note pas les dépendances en t pour simplifier l'écriture) :

$$\frac{V_S^2}{2} - \frac{V_O^2}{2} = \frac{P_S - P_O}{\rho} - g(h_i - h_{ti})$$

On simplifie le terme en V_O^2 , sachant que l'on a $V_O^2 \ll V_S^2$.

Les hypothèses précédentes permettent aussi d'appliquer l'équation de Navier-Stokes à l'écoulement. En intégrant le long d'une ligne de courant entre O et S , cela fournit :

$$P_S - P_O = -\rho g(z_S - z_O) = \rho g(h_{ti} - h_i)$$

D'où finalement $V_S = \sqrt{2g(h_i - h_{ti})}$, et donc :

$$\forall t, D_{i \rightarrow i+1}(t) = \rho S_{ti} \sqrt{2g(h_i(t) - h_{ti})}$$

On peut ainsi injecter ce résultat dans notre bilan de masse (sachant que et l'on a $D_{i \rightarrow i+1}(t) \neq D_{0 \rightarrow 1}(t)$) et l'on obtient les équations utilisées plus tôt (dans le cas de quatre bassins) :

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = -\frac{\sqrt{2g}}{S_b} S_t \sqrt{h_1 - h_{t1}} + \frac{1}{\rho} (j_p(t) - j_e(t)) & \text{(bassin 1)} \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{\sqrt{2g}}{S_b} S_t (\sqrt{h_1 - h_{t1}} - \sqrt{h_2 - h_{t2}}) + \frac{1}{\rho} (j_p(t) - j_e(t)) & \text{(bassin 2)} \\ \frac{dh_3}{dt} = \frac{\sqrt{2g}}{S_b} S_t \sqrt{h_2 - h_{t2}} + \frac{1}{\rho} (j_p(t) - j_e(t)) - \frac{D_S}{S_b} & \text{(bassin 3)} \end{cases}$$

La valeur de $j_p(t)$ est donnée par les données de pluviométrie, celle de $j_e(t)$ par étude physico-chimique de l'évaporation. Les dimensions des bassins ont déjà été calculées.

Le Rawlemon

Le Rawlemon est un dispositif qui comprend une sphère constituée d'un polymère acrylique à 99% de transparence et remplie d'eau, qui concentre les rayons du soleil incidents en son point focal. Les rayons sont concentrés plus de 10 000 fois, ce qui permet au dispositif de fonctionner de jour comme de nuit (en utilisant la lumière de la Lune).

La lumière concentrée est recueillie par un panneau photovoltaïque à haut rendement situé sous la sphère. Pour une efficacité optimale, le Rawlemon est motorisée et peut suivre la course du Soleil ou de la Lune.

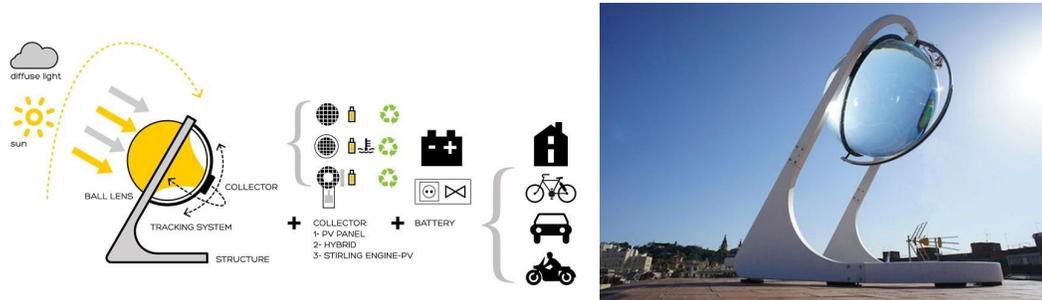


FIGURE 63 – Fonctionnement simplifié et allure du Rawlemon

À puissance équivalente, le Rawlemon divise par dix la surface totale de panneaux nécessaires. De plus, lorsque le ciel est couvert, le Rawlemon produit quatre fois plus d'énergie qu'une installation photovoltaïque classique.

Deux modèles de Rawlemon sont prévus pour l'extérieur, avec des sphères de diamètre 1 mètre ou 1,8 mètre. Ils présentent des collecteurs hybrides pour convertir la lumière incidente en électricité ou en énergie thermique. Ils peuvent ainsi servir de stations de charge pour les vélos, motos ou voitures électriques, alimenter des générateurs ou fournir de l'électricité et du chauffage à des bâtiments. La nuit, ces boules peuvent se convertir en lampadaires LED pour participer à l'éclairage public. Le modèle le plus imposant, le KS 1800, peut compter sur sa puissance électrique de 560 W, sa puissance thermique de 890 W et son rendement de 57% en mode hybride, pour fournir jusqu'à 3,4 kWh par jour. Il est doté d'une batterie de 0,5 kWh, pèse 3,35 tonnes (dont 3,05 tonnes d'eau) et peut résister à des vents de 120 m.s^{-1} . Les deux modèles sont proposés respectivement à 6000 € et 8999 €.

Les oyas — arrosage économique, responsable et naturel

Les oyas sont des pots en céramiques microporeuses que l'on peut remplir d'eau et enterrer à proximité d'une plante, pour permettre une diffusion progressive de l'eau. Les plantes absorbent seulement l'eau dont elles ont besoin, ce qui permet d'économiser jusqu'à 75% d'eau.

Les pots sont fabriqués à la main en France, avec de l'argile naturelle et permettent une irrigation autonome, sans évaporation de l'eau. Avec un tel système, les plantes ne sont pas humides en surface, ce qui diminue les maladies et la présence de mauvaises herbes.



FIGURE 64 – Fonctionnement d'une oya

La fréquence de remplissage varie selon la taille du pot ou le type de plante et de sol : elle est de l'ordre d'une semaine pour une jarre usuelle de 10L. Si l'on considère une plantation de 1000 plantes par an, avec des oyas de 10L pouvant alimenter 2 à 3 plantes, le coût d'installation se situe aux alentours de 10 000 €.

Un méthaniseur pour répondre aux demandes d'engrais

Un méthaniseur permettrait d'utiliser les ordures du restaurant et les biodéchets pour former du méthane et du jus à diluer qui fait un engrais très intéressant. Le gaz produit localement et gratuit une fois le coût des installations amorti et on diminue les émissions de gaz à effet de serre : combustion du méthane (CH_4 plus réchauffant que CO_2), évite d'utiliser du propane en plus. Cependant, l'installation est assez encombrante (8 m^2 au sol) et proche du restaurant, peu esthétique et non isolée.

La consommation actuelle de gaz est d'environ 25 bonbonnes de 35 kg de propane (soit 900 kg.an^{-1}). Cette consommation peut être couverte par la fermentation de 43 tonnes de déchets organiques par an (soit 2300 kg de biogaz à 60% de teneur en méthane, différence de densité énergétique propane/méthane). Le restaurant produit 50 à 70 tonnes de déchets fermentescibles par an, et on a 100 à 135 tonnes de feuilles et d'herbe résultant de l'entretien du jardin, ce qui ne sert pas au paillage des sols peut ainsi être utilisé pour la méthanisation. *On a donc la capacité de faire tourner la gazinière à partir des ressources du domaine uniquement.*

Un méthaniseur de 1000 L de capacité permet facilement la méthanisation des déchets fermentescibles d'un restaurant qui fait 25 couverts par repas (données d'Olivier Nattes), on pourrait alors opter pour un méthaniseur avec 4300 L de digesteur.

Le prix de ce méthaniseur serait de 1100 € environ + 300 € estimés pour brûleurs, injecteurs, tuyaux, compresseur, filtre à odeurs. Soit 1400 € de dépenses. Actuellement : 1250 € dépensés par an donc l'installation est amortie en 14 mois.

Bilan des installations, évaluation des coûts

Cette partie récapitule très brièvement toutes les opérations techniques à réaliser pour aboutir au projet présenté. On en profite pour évaluer les coûts financiers de telles opérations (on ne détaillera pas les coûts de chaque partie des travaux ainsi que les maîtres d'ouvrage).

- *Construire un réseau électrique* : centraliser la consommation et la production électrique du domaine du Rayol en disposant d'un réseau électrique opérationnel. Cela demande la creusée de tranchées, l'enterrement des lignes, la pose d'un transformateur d'isolement, d'armoires électriques et d'un système de stockage (gestion des surtensions) → 100 000 €. *Option alternative : adapter le réseau en place*. Il faudra dans ce cas commencer par prospecter le nouveau réseau, juger la faisabilité d'un rattachement à ce réseau (si oui il faudra refaire une partie du réseau et installer un transformateur d'isolement) → 25 000 €
- *Panneaux photovoltaïques* : solution principale retenue pour atteindre l'autonomie énergétique sur le domaine. Nous avons retenu six sites pour une potentielle pose de panneaux, pour une production annuelle couvrant une grande partie des consommations du domaine si le système de stockage est bien géré. Cela demande une étape de raccordement au réseau en plus de l'installation des panneaux en elle même. → 650 000 € pour produire 280 MWh par an, 350 000€ pour 150 MWh. Il faudra de plus construire la structure d'ombrière au niveau des parkings et la pergola (environ 150 000 € chacune)
- *Installer un chauffage central dans l'hôtel de la mer* : avec une chaudière comme source de chaleur (il faudra installer de nouveaux radiateurs, réaliser des tuyauteries, la PAC en elle même et mettre en place le nouveau réseau) → 60 000 €, coût amorti en 10 ans (voir l'annexe page 39). Si l'on se tourne vers une solution d'aérothermie, le coût avoisinera 90 000 € et sera amorti en 40 ans.
- *Produire son propre gaz à l'aide d'un méthaniseur* : il faudra reconstruire l'ancienne porcherie, acheter et installer le méthaniseur puis le raccorder à la gazière → 1400 €
- *Stockage d'énergie avec la μ -STEP* : stockage réversible de 15 kWh, irréversible de 60 kWh. La puissance de sortie est de 10 kW. Cela demandera la construction du nouveau sentier visiteurs qui monte vers le Cairn et d'un bâtiment au point le plus haut (« belvédère », cuve de 942 m³), ainsi que le creusage de la cuve en point bas (terrasse maison de la plage côté Nord de 96 m³) et des tranchées, la mise en place des conduites d'eau (en parallèle avec celles nécessaires à l'irrigation). Finalement, il reste à prendre en compte la mise en place de la turbine de 10 kW et de la pompe 20 kW (avec le système électrique associé à raccorder au réseau) → 275 000 € hors construction du belvédère.
- *Analyses relatives aux sources d'eau* : diverses études et mesures géologiques et hydrologiques seront nécessaires pour avoir une meilleure connaissance et gestion de la source d'eau → environ 25 000 €
- *Mise en place des lagunes pour récupération des eaux usées* : l'écoulement d'un bassin à l'autre est gravitaire et se fait sans intervention humaine ou électricité. Il faut donc simplement ajouter un court réseau de tuyaux pour mener l'eau de l'entrée du dégrilleur à la sortie du dernier bassin. Le coût des installations est donc celui des machines relatives au pré-traitement (environ 5000 € (entre 1000 € et 2000 € pour chacun des dispositifs), de la tuyauterie (au plus 1000 €) et enfin de l'excavation des bassins (12000 €), soit 18 000 € au total.
- *Mise en place des systèmes de récupération d'eau de pluie et d'irrigation, stockage agrandi* : cela nécessitera l'installation de gouttières (2000 €) et la construction des béals (route) (35 000 €). Les cuves et la gestion de la cave pour stockage reviendraient à quelques milliers d'euros.

Soit au total un projet estimé entre 1 et 1,5 millions d'euros selon les panneaux photovoltaïques choisis et la proportion de solutions retenues.

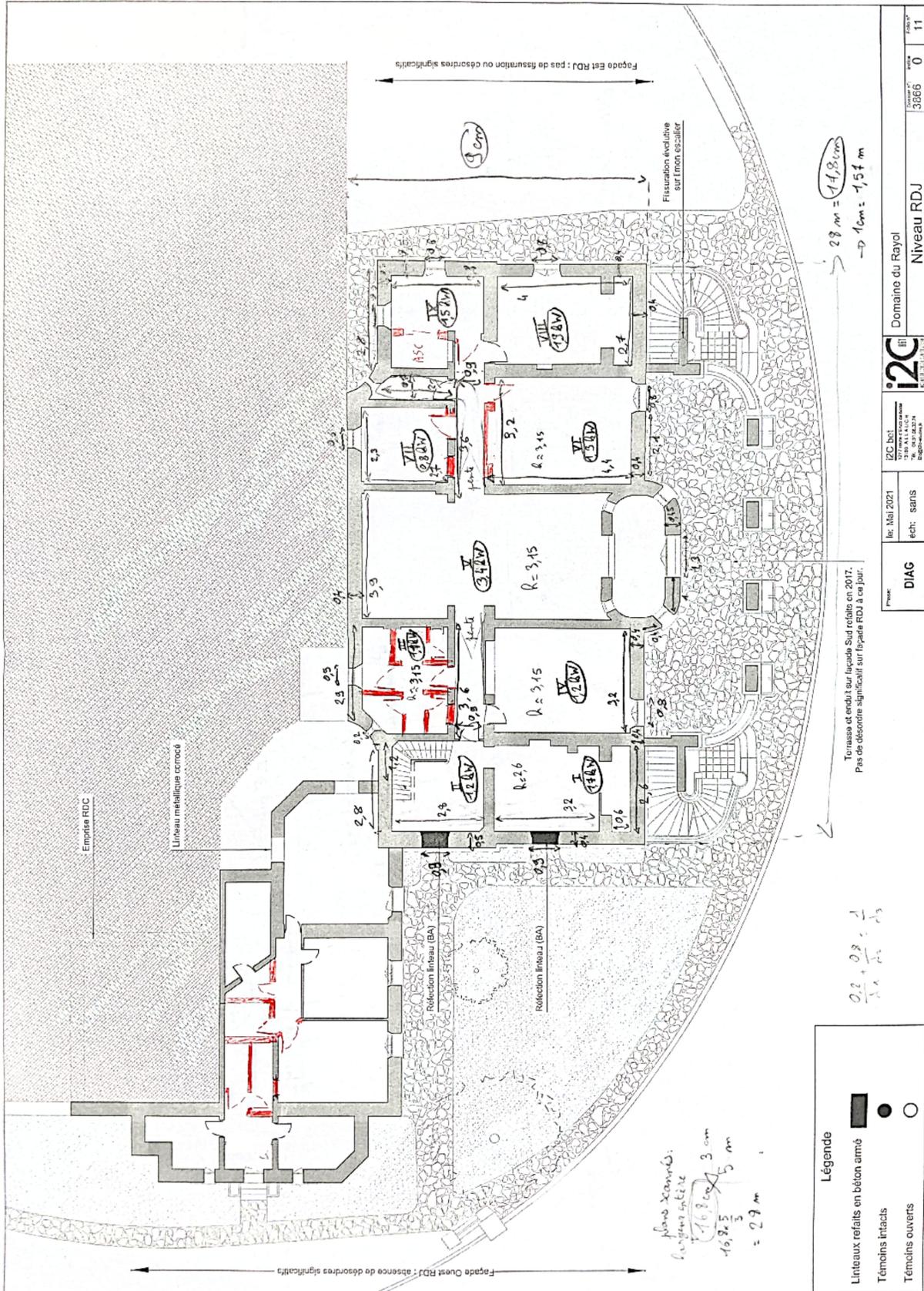


FIGURE 66 – Puissance thermique utilisée par salle - rez-de-chaussée

