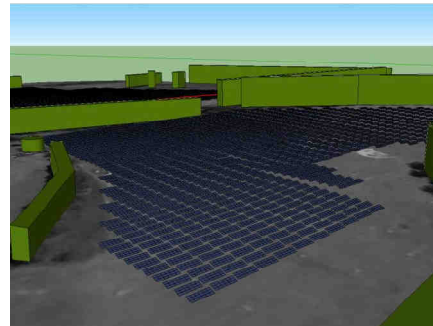
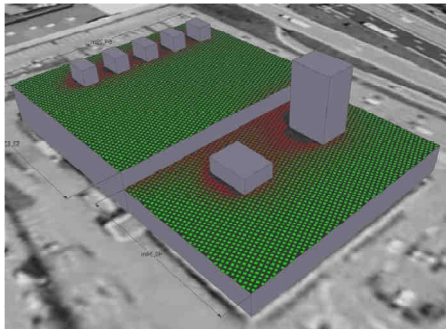


Optimisation des centrales photovoltaïques

L'OFFRE DE CYTHELIA



Contexte, enjeux

Le 1^{er} septembre 2010, le gouvernement a annoncé une baisse des tarifs de vente de l'électricité photovoltaïque de 12%, excepté pour les installations inférieures à 3 kWc sur des bâtiments d'habitation. Celle-ci fait suite à une première baisse en janvier 2010, accompagnée d'une moindre indexation des tarifs sur l'inflation (20% du tarif indexé contre 60% auparavant). Elle se cumulera avec la baisse de 10% par an prévue à partir du 1^{er} janvier 2012.

Dans ce contexte, l'optimisation des centrales photovoltaïques s'avère être de plus en plus déterminante pour permettre aux projets photovoltaïques d'atteindre une bonne rentabilité.

Les atouts de Cythelia

Une expérience confirmée en photovoltaïque de plus de 15 ans

Cythelia intervient depuis plus de 15 ans sur les problématiques photovoltaïques à tous les niveaux :

- **Recherche & Développement** : Cythelia s'implique dans de nombreux programmes de recherche, pour notre propre compte ou le compte de tiers,
- **Consulting** : conseil sur le choix des technologies et produits, sur les méthodes de mise en œuvre, sur l'analyse de la rentabilité ainsi que sur les montages financiers et juridiques,
- **Logiciel de dimensionnement Archelios®** : Cythelia a développé et édite Archelios®, le seul logiciel de dimensionnement photovoltaïque français, qui permet un vrai travail en 3D,
- **Assistance à Maîtrise d'Ouvrage (AMO)** : études stratégiques, rédaction de plans d'affaires, études d'opportunités, études d'opportunité et de faisabilité, assistance à la sélection d'opérateurs et de produits (rédaction de CCTP, analyse des offres),
- **Maîtrise d'œuvre (MOE)** : études d'exécution, suivi de chantier, réception, etc.
- **Etude exhaustive des systèmes d'intégration au bâti**, qui fait référence en France (acquise notamment par l'INES, First Solar, GDF-Suez, St Gobain, le SIPPAREC),
- **Bilan Carbone photovoltaïque** (Bilan Carbone® de Photowatt et de plusieurs centrales photovoltaïques au sol),
- **Formation** : Cythelia est organisme de formation et propose notamment un cycle de formation photovoltaïque sur 5 jours,
- **Lettre du solaire** : depuis 2001, Cythelia édite cette publication mensuelle, qui sélectionne les faits marquants dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque et des sujets afférents.

Alain Ricaud est fondateur et gérant de Cythelia. Ingénieur Supelec, Docteur ès sciences, MBA-ICG-Paris. 30 ans d'expérience dans le solaire photovoltaïque. Ancien directeur de France Photon à Angoulême (1979-84), puis de Solarex aux USA (1985-88), et de Solems à Palaiseau (1989-92). Professeur Associé à l'Université de Savoie. Expert de la DG TREN et de la DGR de l'UE. Expert pour OSEO et l'ANR.

Ismaël Lokhat, est responsable du service Maîtrise d'œuvre. Master écotechniques VERDEC, Polytech'Savoie. Il a participé à la maîtrise d'œuvre de la construction de la Maison ZEN. Il est en charge des programmes R&D photovoltaïque et R&D bâtiment ainsi que du monitoring de la Maison ZEN.

Arnaud Rochette est directeur commercial de Cythelia, Institut Supérieur de Gestion, Institut technique de banque. Spécialiste du "coaching", du "team building" et de l'ingénierie de formation, il est l'expert sur les questions financières et particulièrement en charge du service Formation.

Benoit Lelong est responsable des missions d'AMO et de Bilans Carbone. Ingénieur des Mines, spécialisé en Environnement et Eco-Industries, il a une expérience de 6 ans dans les énergies renouvelables, notamment sur des projets photovoltaïques en Amérique du Sud et en Afrique.

Guillaume Fortin est issu de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, spécialité «Développement durable & Management environnemental». Il a réalisé de nombreuses études de faisabilité photovoltaïque et est en charge de la veille sur les systèmes photovoltaïques intégrés au bâti.

Stephane Boussac, en charge du service logiciels (développement d'ARCHELIOS et SOLPAC) est docteur en informatique. Il est à l'origine des simulations 3D pour le dimensionnement solaire.

Noémie Sanchez est issue de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, spécialité « Génie énergétique & Environnement ». Elle a réalisé de nombreuses études de faisabilité photovoltaïque, et réalise la maîtrise d'œuvre de centrales photovoltaïque au sol et en toiture.

Mathilde Marduel est issue de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, spécialité « Environnement & Développement durable ». Elle a deux ans d'expérience dans les énergies renouvelables en tant que chef de projets développement de projets éoliens et photovoltaïques.

Une vision transversale pour une optimisation globale

La maîtrise de l'ensemble des étapes d'un projet photovoltaïque permet à Cythelia d'envisager son optimisation globale. En particulier, la connaissance approfondie des mécanismes de la conversion photovoltaïque au niveau des cellules et des modules et des onduleurs, permet de mieux comprendre et de prévenir les effets de mismatch, de pertes en ligne, de température ou d'occultation partielle.

La multi-compétence de Cythelia nous a conduits à bâtir des modèles qui prennent en compte de plus en plus de critères d'optimisation, y compris économiques et financiers puisque nous utilisons la méthode TEC élaborée par Bernard Chabot de l'ADEME.

De plus, l'optimisation globale est un mode de raisonnement qui n'appartient ni à l'ingénieur, ni au financier, mais qui nécessite une vision holistique. Les financiers ont l'habitude de l'optimisation fiscale. Désormais, l'augmentation de la rentabilité des projets passera par l'optimisation technico-économique.

Les optimisations réalisées par Cythelia sur les projets photovoltaïques :

1. Optimisation technico-économique du CUS (centrale au sol ou toiture-terrasse)
2. Optimisation du choix des modules
3. Optimisation du choix des systèmes d'intégration (centrales en toiture)
4. Optimisation du choix du système d'ancrage (centrales au sol)
5. Optimisation technico-économique de l'implantation des modules
6. Optimisation de l'impact visuel de la centrale sur son environnement
7. Optimisation technico-économique du câblage des modules
8. Optimisation technico-économique du choix et du dimensionnement des onduleurs
9. Optimisation du Bilan Carbone®

| | |
|---|----------|
| Contexte, enjeux | 1 |
| Les atouts de Cythelia | 1 |
| Une expérience confirmée en photovoltaïque de plus de 15 ans | 1 |
| Des compétences fortes et diversifiées | 2 |
| Une vision transversale pour une optimisation globale | 2 |
| Optimisation – Notre offre | 4 |
| 1. Optimisation technico-économique du CUS (centrale au sol ou toiture-terrasse) | 4 |
| 2. Optimisation du choix des modules | 5 |
| Choix de la technologie | 5 |
| Choix du fabricant | 5 |
| 3. Optimisation du choix des systèmes d'intégration (centrales en toiture) | 5 |
| 4. Optimisation du choix du système d'ancrage (centrales au sol) | 5 |
| 5. Optimisation technico-économique de l'implantation des modules | 6 |
| 6. Optimisation de l'impact visuel de la centrale sur son environnement | 6 |
| 7. Optimisation technico-économique du câblage des modules | 7 |
| Optimisation de la longueur des câblages | 7 |
| Optimisation du schéma de câblage en fonction des ombrages | 7 |
| Optimisation de la section des câbles | 7 |
| 8. Optimisation technico-économique du choix et du dimensionnement des onduleurs | 7 |
| 9. Optimisation du Bilan Carbone® | 8 |
| Optimisations : tableau récapitulatif | 9 |

1. Optimisation technico-économique du CUS (centrale au sol ou toiture-terrasse)

Le CUS (Coefficient d'Utilisation de Surface) d'une centrale photovoltaïque est défini comme le rapport entre la surface totale de modules installés et la surface du terrain. Plus le CUS est faible, plus les rangées de modules sont éloignées (et donc la puissance installée par hectare est faible) et le gisement élevé.

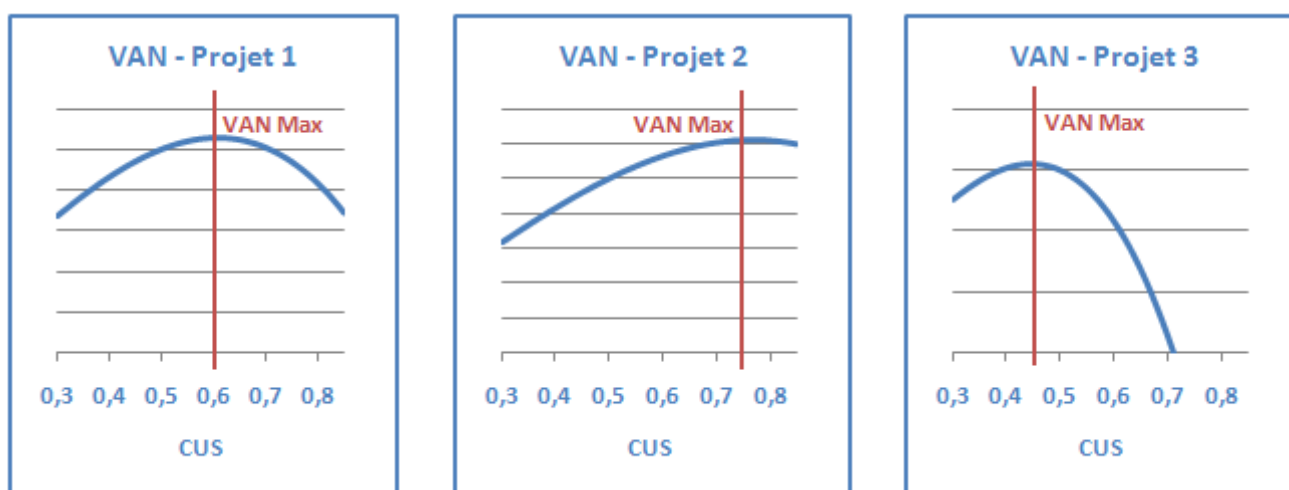
Les bureaux d'études ont l'habitude de prendre comme valeur pour le CUS un compromis pour avoir un bon gisement sans éloigner trop les rangées de modules, **sans procéder à une réelle optimisation.**

En effet, l'optimisation ne peut pas être seulement technique mais doit être technico-économique. En effet, plus on augmente le CUS, plus on peut installer de modules et donc augmenter l'investissement (et la VAN tant que le TRI reste élevé), même si les ombrages augmentent et que le TRI du projet diminue. L'optimisation doit donc se faire en fonction de :

- la surface de terrain disponible, sa topographie et les masques existants,
- les usages programmés du terrain (seulement PV, PV & agriculture, PV & élevage, etc.),
- les contraintes environnementales,
- les seuils administratifs (250 kWc, 12 MWc),
- les coûts (modules, BOS),
- la capacité de financement de l'investisseur,
- la rentabilité attendue sur le projet.

Les outils développés par Cythelia permettent de faire varier le CUS pour obtenir les masques et les gisements correspondants et en déduire des variables financières telles que VAN, TEC, TRI et TRA en déroulant un modèle financier adapté à chacun de nos clients.

Cythelia a ainsi conçu un véritable outil d'aide à la décision permettant un choix rationnel et optimisé du CUS adapté à chaque projet.



CUS optimisé sur la VAN pour 3 projets différents

Le CUS optimisé sur la VAN peut varier de manière très importante en fonction des projets !

2. Optimisation du choix des modules

Choix de la technologie

Le marché des couches minces est en pleine explosion depuis ces dernières années et le choix technologique ne se porte plus obligatoirement sur le silicium mono ou multicristallin. Les connaissances et l'expérience accumulée par les collaborateurs de Cythelia permet d'accompagner ses clients pour optimiser le choix de la technologie par rapport aux contraintes techniques et à leurs besoins.

Choix du fabricant

Il existe au niveau mondial plus de 8 000 références de modules, comment s'y retrouver ?

Cythelia suit depuis plus de 15 ans les évolutions du marché et a vu l'émergence de tous les nouveaux fabricants. Les audits et due diligence que Cythelia réalise nous permettent d'avoir une connaissance pratique de nombreux fabricants pour accompagner au mieux nos clients dans leurs choix.

3. Optimisation du choix des systèmes d'intégration (centrales en toiture)

Pour les centrales photovoltaïques en toiture, le choix du système d'intégration est déterminant. Comment s'y retrouver au milieu des 90 systèmes d'intégration existants sur le marché français aujourd'hui ?

Cythelia a réalisé l'étude la plus complète disponible aujourd'hui en France, qui recense et fait ressortir les avantages et inconvénients de chaque système. Cette étude fait référence et a été acquise par des acteurs majeurs : INES (Institut National de l'Energie Solaire), First Solar, GDF-Suez, St Gobain, Schüco, le SIPPPEC (Syndicat Intercommunal de la Périphérie de Paris pour l'Electricité et les Réseaux de Communication).

Grâce à cette étude et à nos connaissances des systèmes, nous pouvons guider au mieux nos clients dans le choix du système d'intégration adapté à leurs besoins et leurs contraintes (taille, usage et environnement immédiat du bâtiment, etc.).

4. Optimisation du choix du système d'ancrage (centrales au sol)

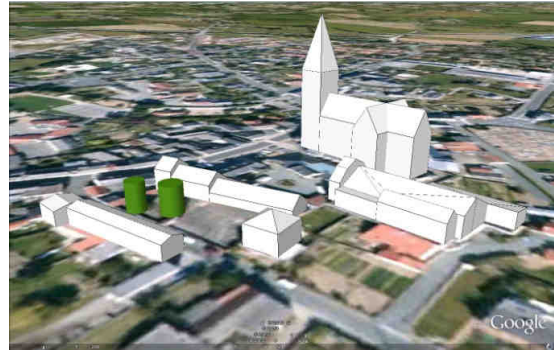
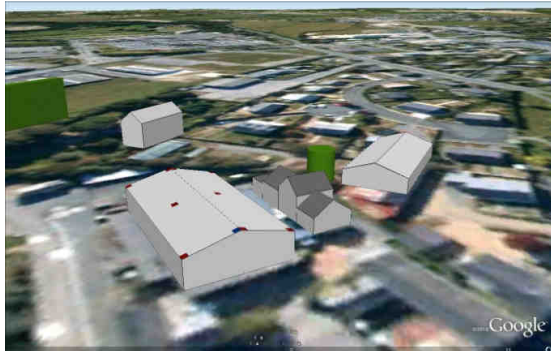
L'expérience de Cythelia et nos contacts privilégiés avec les fabricants nous permettent d'optimiser le choix des solutions d'ancrage en fonction des contraintes des projets de nos clients :

- coûts,
- type de terrain,
- usages programmés du terrain (seulement PV, PV & agriculture, PV & élevage, etc.),
- Bilan Carbone® de l'installation,
- etc.

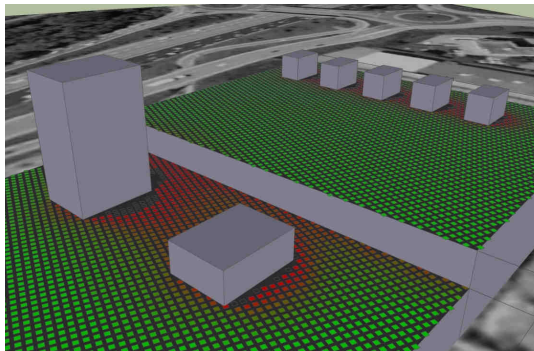
5. Optimisation technico-économique de l'implantation des modules

Cythelia optimise l'implantation des modules par rapport aux ombrages grâce à son logiciel de dimensionnement Archelios®, qui permet de :

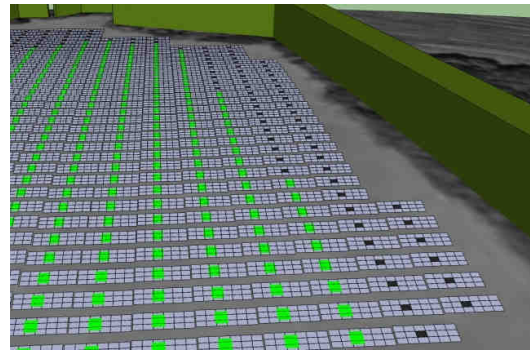
Modéliser de manière rapide et efficace l'environnement du site (centrale au sol ou en toiture) afin d'évaluer les masques proches grâce à l'interface d'Archelios® avec l'outil Google Sketch up :



Evaluer le gisement solaire en chaque point de la toiture ou du terrain, afin d'optimiser l'implantation des modules :



Dégradé de couleur en fonction du gisement



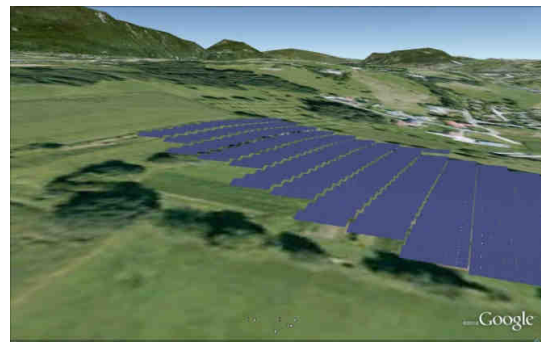
Sélection des modules en fonction d'un seuil de gisement déterminé à partir de données financières

6. Optimisation de l'impact visuel de la centrale sur son environnement

L'intégration des centrales photovoltaïques dans l'environnement acquiert de plus en plus d'importance pour l'acceptation des projets photovoltaïques. Le lien entre Google Sketch up et Google Earth permet de visualiser la centrale depuis n'importe quel point de son environnement :



Vue "de la rue"



Sélection des modules en fonction d'un seuil de gisement

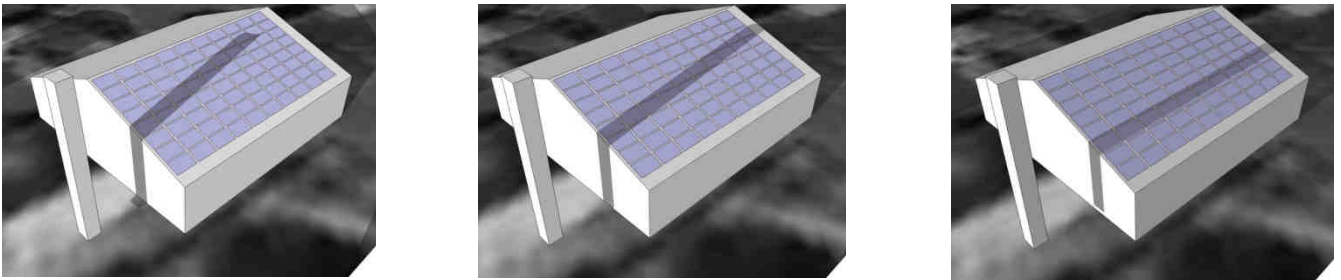
7. Optimisation technico-économique du câblage des modules

Optimisation de la longueur des câblages

Les onduleurs ont des contraintes électriques (intensité, tension, puissance) et de connectique (nombre de connecteurs d'entrée, de MPPT). Cythelia optimise le choix de l'onduleur et le câblage des modules pour augmenter le ratio de performance, diminuer les longueurs de câbles et donc les coûts et faciliter le travail des électriciens.

Optimisation du schéma de câblage en fonction des ombrages

Grâce à nos outils de modélisation, nous pouvons déterminer l'évolution des ombres portées sur la surface qui sera recouverte de modules photovoltaïques, afin de déterminer le schéma de câblage qui permettra de minimiser les effets d'ombrage partiel : un seul module ombré d'une rangée de modules connectés en série influe en effet sur toute la rangée.



Visualisation des ombrages à différentes heures de la journée.

Optimisation de la section des câbles

Les sections de câbles sont souvent déterminées à partir de formules simples qui ne prennent pas en compte l'aspect coût. En effet, plus la section est importante, plus les pertes sont faibles, ce qui implique un gain de productible, donc de vente d'électricité, mais une augmentation des coûts.

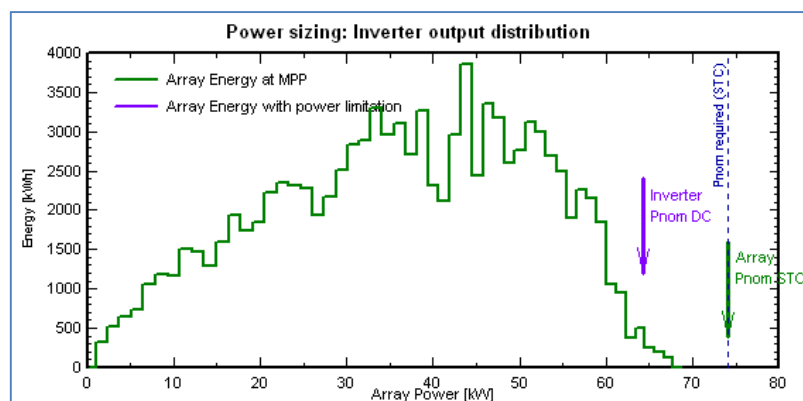
Cythelia réalise ainsi une optimisation technico-économique afin de déterminer les sections optimales.

8. Optimisation technico-économique du choix et du dimensionnement des onduleurs

Cythelia réalise une optimisation technico-économique du dimensionnement des onduleurs et en particulier le rapport *Puissance onduleur* sur *Puissance-crête* ($P_{\text{ond}}/P_{\text{crête}}$). En effet, ce rapport influe sur le coefficient de performance et sur le prix de la centrale.

Il doit a priori être le plus faible possible mais en-dessous d'une certaine valeur, l'onduleur est obligé "d'écarter" lors des moments où l'éclairage est le plus fort. Cythelia utilise des outils permettant de simuler cet effet pour un choix optimal des onduleurs.

*Une séance de travail de 2 heures avec l'un de nos clients
a permis de lui faire gagner 180 k€ sur une centrale de 2 Mwc.*



Répartition de l'énergie produite en fonction de la puissance

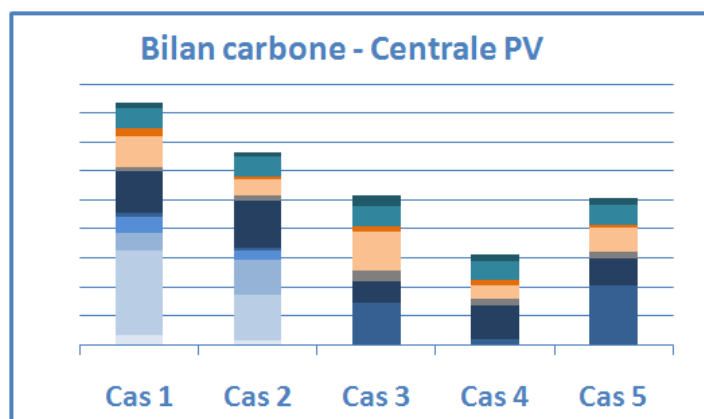
9. Optimisation du Bilan Carbone®

Depuis le début de l'année 2009, la pression des pouvoirs publics pour la prise en compte du Bilan Carbone® de la production d'électricité photovoltaïque est croissante :

- de nombreuses DREAL demandent la réalisation d'un Bilan Carbone® durant la phase d'étude de projets de centrales photovoltaïques au sol,
- le MEEDDM, dans la circulaire du 18 décembre 2009, invite les préfetures à « examiner la pertinence des projets [de centrales au sol] au regard du bilan carbone global de l'installation en cause »,
- des appels d'offres font apparaître le critère carbone pour la sélection d'opérateurs sur des centrales en toiture, en lui accordant une pondération jusqu'à 25%¹.

Cythelia a réalisé une étude comparative des contenus carbone des modules photovoltaïques en fonction de la technologie et des pays de fabrication des différentes étapes du process, basée sur l'étude de plus d'une cinquantaine de publications scientifiques.

En fonction de chaque projet, Cythelia est ainsi en mesure d'optimiser le Bilan Carbone® de la centrale dès la phase d'étude dans une démarche d'éco-conception, en ajoutant l'impact du BOS ("Balance Of System" ou "Reste du Système", soit l'ensemble de l'installation exceptée les modules photovoltaïques) adapté à chaque client et projet.



Bilan Carbone d'une centrale photovoltaïque suivant 4 options

¹ Voir l' « Appel à projet de centrales photovoltaïques en vue d'octroyer des autorisations d'occupation temporaire (AOT) sur des bâtiments domaniaux de l'Etat dans les départements de la Région Rhône-Alpes »

| Optimisations | Centrales AU SOL | Centrales EN TOITURE |
|--|------------------|---|
| CUS (Coefficient d'Utilisation de la Surface) | X | Toitures-terrasses avec modules inclinés |
| Implantation des modules | X | X |
| Impact visuel | X | X |
| Choix et dimensionnement onduleurs | X | X |
| Câblage | X | X |
| Choix des modules | X | X |
| Choix des systèmes d'intégration | | X |
| Choix des systèmes d'ancrage | X | |
| Bilan Carbone® | X | X |

Cythelia

Maison ZEN
Chef Lieu
73000 Montagnole
Tél : 04 79 25 31 75
Fax : 04 79 25 33 09

