

Compte rendu de projet tuteuré

CONCEPTION D'INDICATEURS POUR DES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES



Réalisé par Patrick ALLALI et Pascale AUFFRET

De la Licence Professionnelle Assistant et Conseiller
Technique en Énergie Électrique et Renouvelable (ACTEER)
Promotion 2018-2019

Avec

ÉNERGIES DU PAYS
DE RENNES



UNIVERSITÉ DE
RENNES 1

Encadré par Gaëla VANDERHAGHEN et Elias MARTIN

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont accompagnés tout au long de ce projet d'étude.

Tout d'abord, nous tenons à remercier Jaume Caus, un camarade de promotion avec qui nous avons commencé ce projet, et qui a changé d'objectif professionnel en cours d'année. C'est grâce à lui que nous avons eu l'opportunité de réaliser ce projet, nous sommes reconnaissant envers le travail qu'il a tout de même fourni, et nous lui souhaitons beaucoup de bonheur dans sa nouvelle voie professionnelle.

Nous remercions particulièrement Gaëla Vanderhagen, membre de l'association Énergies du Pays de Rennes, pour nous avoir accompagné tout au long de ce projet tuteuré. Merci pour sa disponibilité, ses conseils éclairés et la sympathie qu'elle nous a témoigné.

Nous remercions Elias Martin, également membre d'Énergies du Pays de Rennes, pour son accompagnement et les compétences techniques qu'il a su nous partager.

Enfin, merci à tous les membres de l'association Énergies du Pays de Rennes du travail bénévole et audacieux qu'ils fournissent pour donner sa place au citoyen dans la transition énergétique locale.

Résumé

Cette étude doit permettre à l'association Énergies du Pays de Rennes d'obtenir des outils pour valoriser ses projets de centrales photovoltaïques dans la politique énergétique de Rennes Métropole. Ces outils doivent aussi démontrer à tout citoyen l'efficacité de cette énergie renouvelable. Pour cela, nous avons analysé le Plan Climat Air Énergie Territorial de la métropole et évalué l'Analyse du Cycle de Vie de la première centrale photovoltaïque de l'association. Nous avons également conçu 6 indicateurs qui permettent d'estimer les performances énergétiques, financières et environnementales de centrales solaires, tout en valorisant les économies d'énergie. Des pistes d'améliorations ont été avancées pour optimiser l'efficacité des prochains projets de centrales photovoltaïques.

Abstract

This study should enable the "Energies du Pays de Rennes" association to obtain tools to promote its photovoltaic power plant projects in the energy policy of Rennes Métropole. These tools must also demonstrate to every citizen the efficiency of this renewable energy. To do this, we analysed the Metropolitan Air Energy Climate Plan and assessed the life cycle costing (LCC) of the association's first photovoltaic plant. We have also designed 6 indicators that make it possible to estimate the energy, financial and environmental performance of solar power plants, while valuing energy savings. Suggestions for improvement have been put forward to optimize the efficiency of the next photovoltaic power plant projects.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	3
Introduction	5
Énergies du Pays de Rennes	6
État de l'art des indicateurs	7
Examen de l'Analyse du Cycle de Vie de la centrale photovoltaïque	12
Examen du Plan Climat Air Énergie Territorial de Rennes Métropole	17
Réalisation d'indicateurs	22
Le Temps de Retour Énergétique (TRE)	22
La comparaison au Livret A	24
Le Temps de Retour Carbone (TRC)	25
Impact carbone : le facteur d'émission	28
Masses de déchets nucléaires évités	29
Nombre de foyers alimentés	30
Conclusion	32
Annexes	33

Introduction

L'objectif de ce projet tuteuré est de concevoir des indicateurs qui permettent à tous citoyens, petits et grands, de comparer les performances environnementales, énergétiques et financières de centrales photovoltaïques. Les indicateurs que nous définirons seront développés par des étudiants de l'ENS et valorisés par l'association Énergies du Pays de Rennes afin de démontrer les multiples bénéfices des centrales photovoltaïques à Rennes. Aussi, de tels indicateurs devraient permettre à l'association de déterminer quels sont les formats et types de centrales photovoltaïques les plus intéressantes économiquement et écologiquement.

Ces indicateurs utiliseront des données propres à la centrale photovoltaïque concernée, à sa conception, aux coûts et bénéfices financiers qu'elle engendre, à la production d'électricité sur sa durée de vie, etc.

Avant de nous lancer dans l'élaboration de ces indicateurs, nous avons fait un état de l'art des indicateurs dédiés au photovoltaïque, pour nous permettre de voir ce qui se fait déjà, et potentiellement pour nous en inspirer.

Mais avant même de nous lancer dans la conception d'indicateurs, il nous a été demandé de réaliser deux autres grandes tâches :

La première consiste en l'étude du Plan Climat Air Énergie Territorial de Rennes Métropole (PCAET), afin de réaliser un bilan énergétique de la ville. Cela doit nous permettre de mieux cerner la place de l'électricité renouvelable dans la métropole.

Le seconde consiste en l'examen de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) de la centrale photovoltaïque installée sur l'école Albert De Mun, pour nous permettre d'étudier les données de la centrale, de comprendre la méthodologie d'une telle analyse et de confirmer ou non certains résultats.

La centrale solaire de 36 kWc a été installée en juin 2018 sur le toit de l'école primaire Albert De Mun, à Rennes. Cela représente 244 m² de panneaux solaires monocristallins V-SYS 250 WC de marque Systovi¹. Les cellules photovoltaïques proviennent de Chine, et les panneaux ont été assemblés dans une usine spécialisée à Carquefou (Loire-Atlantique). Le choix technique pour les onduleurs s'est porté sur des micro-onduleurs EMPHASE ENERGY M215, inféodés à chaque panneau. Le système a une orientation presque idéale plein sud avec un angle de 30°. La production annuelle électrique a été estimée par le bureau d'étude à 35 120 kWh, elle sera autoconsommée avec revente du surplus.

La ville de Rennes et l'association Énergies du Pays de Rennes ont inauguré officiellement l'installation le vendredi 12 octobre 2018.

Le cahier des charges établi au début du projet se trouvera en Annexe 1.

¹ Systovi - créateur et fabricant français de solutions multi-énergies innovantes dédiées à l'habitat <http://www.systovi.com/>

Énergies du Pays de Rennes

Énergies du Pays de Rennes est une association loi 1901, créée le 16 octobre 2017. Elle a pour but de favoriser la transition énergétique sur le territoire du Pays de Rennes par l'implication de tous les citoyens qui le souhaitent.



L'association s'est formée à partir du collectif mobilisé autour d'un projet de centrale solaire photovoltaïque, proposé et sélectionné dans le cadre du budget participatif de la ville de Rennes. En plus de la mise en place d'une centrale solaire sur le toit de l'école Albert de Mun, ce projet prévoit également l'élaboration de démonstrateurs et prises de mesures afin de mieux comprendre ce que représente une telle centrale.

Le projet associatif s'articule ainsi autour de 3 ambitions :

- Constituer un réseau de financeurs : citoyens, collectivités, sociétés d'investissement en phase avec les valeurs citoyennes.
- Créer une structure juridique coopérative qui va permettre de réaliser 3 premières centrales solaires.
- Développer la prise de conscience et l'implication des citoyens sur ces sujets à travers des actions et outils pédagogiques.

La première centrale de 36 kWc a été inaugurée et est fonctionnelle depuis octobre 2018, elle fera l'objet de ce projet tuteuré. Un second projet de centrale photovoltaïque est en préparation pour le toit de la patinoire Le Blizz à Rennes, il devra faire appel à des investissements citoyens. Et pour pouvoir organiser cela, l'association a créé la société coopérative CIREN qui est chargée d'acheter et d'installer des centrales de production d'électricité d'origine renouvelable et locale. Aussi, cette entreprise devra rassembler les fonds pour financer des projets, et assurer leur rentabilité.

L'entreprise constituée adopte les caractéristiques suivantes :

- Forme juridique SAS (Société par Actions Simplifiée).
- Mode de décision coopératif : 1 personne = 1 voix.
- Au-delà du nécessaire équilibre économique des comptes, souhait de rémunérer l'investissement à un taux de l'ordre de 1% annuel.

État de l'art des indicateurs

Définition : Un indicateur est une information chiffrée qui fournit une échelle sur laquelle une performance peut être mesurée, conformément à un critère d'application.²

Il peut s'agir de : taux, ratio, pourcentage, moyenne, classement, nombre, index composite (une combinaison de plusieurs indicateurs), qualitatif (classe), etc.³

Nous avons recherché des indicateurs existants ainsi que des formules pouvant nous aider à construire des indicateurs. Ils sont ci-dessous classés selon l'efficacité qu'ils évaluent :

- Production d'électricité
- Économie
- Écologie (énergie, environnement, éthique)

Efficiences de la production

- Taux d'autoconsommation immédiate (%) = Production immédiate de la centrale / Consommation immédiate du bâti
- Taux d'autoconsommation périodique (%) = Production sur une période (jour, mois ou année) / Consommation du bâti sur la même période

Efficiences économiques

- Rentabilité financière par euro investi ($\frac{\text{€}_{\text{gagné}}}{\text{€}_{\text{investi}}}$) = Somme des gains financiers sur la durée de vie de l'installation / Somme des investissements sur la durée de vie de l'installation
- La VAN (Valeur Actuelle Nette)⁴ : consiste à calculer la valeur actualisée des différents flux financiers sur la durée de vie du projet en intégrant l'investissement initial. De façon simplifiée, c'est le gain financier engendré par le projet sur sa durée de vie. L'actualisation a pour but de tenir compte l'évolution de la valeur de l'argent.

Exemple : Investissement initial = 1 000 000 €
Économie annuelle = 100 000 €
Durée de vie = 20 ans
Taux d'actualisation = 4 %
Économies actualisées = 1 359 033 – 1 000 000 = 359 033 €.

² Association Société Française de l'Évaluation - Les enjeux de l'indicateur - 2007 - p.4
http://www.ssests.uvsq.fr/IMG/pdf/Diapaorama_introduction_dethier.pdf

³ Techniques d'observation et méthodes d'analyse pour la gestion de l'eau dans les bassins versants agricoles méditerranéens - INRGREF p.10 - 2015
<https://www.almira-project.org/sites/almira-project.org/files/18-20150304-sys-int-4-indicateurs.pdf> -

⁴ Méthode d'analyse économique des projets - ADEME IDF
<https://ile-de-france.ademe.fr/sites/default/files/files/DI/Energies-matieres-renouvelables/Methode-analyse-economique-des-projets.pdf>

année	économies actualisées
1	96 154
2	92 456
3	88 900
4	85 480
5	82 193
6	79 031
7	75 992
8	73 069
9	70 259
10	67 556
11	64 958
12	62 460
13	60 057
14	57 748
15	55 526
16	53 391
17	51 337
18	49 363
19	47 464
20	45 639
Somme des économies actualisées	1 359 033

La valeur d'une somme d'argent d'aujourd'hui, à une année future « n », doit être appréciée moyennant l'application d'un coefficient d'actualisation. Ce coefficient d'actualisation dépend:

- du taux d'intérêt monétaire
- de la dépréciation monétaire
- du taux de rendement de certains placements sur le marché.

Exemple : Avec un taux d'actualisation de 8% (couramment retenu dans le secteur de l'énergie), un montant de 100 € :

- aujourd'hui vaut..... 100 € "d'aujourd'hui"
- dans n = 5 ans vaut.....68 € "d'aujourd'hui"
- dans n = 10 ans vaut.....46 € "d'aujourd'hui"

Formule : $V_0 = V_n(1+i)^{-n}$ (V_0 valeur actualisée, V_n valeur considérée à l'année « n », i taux d'actualisation)

année	économies actualisées	Détermination du temps de retour actualisé
1	96 154	-903 846
2	92 456	-811 390
3	88 900	-722 490
4	85 480	-637 010
5	82 193	-554 817
6	79 031	-475 786
7	75 992	-399 794
8	73 069	-326 725
9	70 259	-256 466
10	67 556	-188 910
11	64 958	-123 952
12	62 460	-61 492
13	60 057	-1 435
14	57 748	56 313
15	55 526	111 839
16	53 391	165 230
17	51 337	216 567
18	49 363	265 930
19	47 464	313 394
20	45 639	359 033
Somme des économies actualisées	1 359 033	

- Le TRA (temps de retour actualisé) : C'est le nombre d'années nécessaire pour que le cumul des économies annuelles actualisées équilibre l'investissement. Dans le tableau ci-contre (qui reprend les valeurs de l'exemple précédent), le temps de retour actualisé est légèrement supérieur à 13 ans.

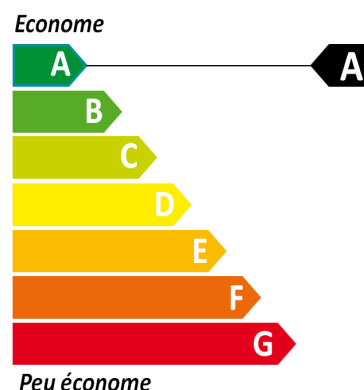
- Le TRB (temps de retour brut)⁴ : C'est le temps nécessaire pour que le cumul des économies annuelles équilibrent l'investissement : il ne prend pas en compte la notion d'actualisation ou la durée de vie du projet et constitue donc un indicateur économique peu pertinent, bien qu'il soit simple à utiliser.

Exemple : Investissement initial = 1000 000 €
 Economie annuelle = 100 000 € / an
 Temps de retour brut = 1 000 000 / 100 000 = 10 ans

- Le RSI (temps de retour sur investissement) : C'est équivalent du TRB en intégrant les coûts annexes (assurance, coût de maintenance et d'entretien, évolution du prix de l'électricité, taux d'intérêts de l'emprunt, etc.).

Efficiences écologique

- Diagnostic de durabilité : évalue les performances de l'exploitation selon les 3 piliers de la durabilité (environnementale, sociale et économique)⁵
- L'étiquette énergie⁶ : Elle présente les références complètes de l'objet considéré (fabricant, modèle, etc.) ; sa catégorie de consommation énergétique (parmi sept possibilités symbolisées par une couleur dans une palette du vert au rouge et identifiées par une lettre de A à G, déterminées en fonction d'un découpage linéaire) ; des informations connexes qui permettent de mieux comprendre le contexte dans lequel les mesures sont effectuées (ensoleillement, température, etc.). Cette indicateur permet de comparer les appareils de même fonction, ainsi de labelliser les mieux classés. Surtout, cet indicateur a pour objectif de communiquer avec le grand public de manière simplifiée les performances d'un appareil et d'autres informations supplémentaires pour qu'il puisse comparer et choisir le meilleur outil selon son budget (rapport qualité-prix). Ce format d'étiquette compare les consommations d'énergie, il n'est pas applicable pour des systèmes qui en produisent. Cependant le format est intéressant pour comparer des panneaux photovoltaïques en fonction de leur énergie grise ou de leur impact carbone.



D'ailleurs, il existe également l'étiquette carbone.

Efficiences énergétique (énergie grise) :

- Taux de retour énergétique (TRE) ou EROEI («Energy Returned On Energy Invested») = énergie utilisable / énergie dépensée
Il mesure la compensation de l'énergie grise du système, quand l'EROEI est inférieure ou égale à 1, cette source d'énergie devient un « puit d'énergie ».
- Taux de retour énergétique "sustainable" = énergie récupérée sur la vie (énergie utilisable) / énergie non renouvelable dépensée sur la vie
- Temps de retour énergétique = durée nécessaire à la production par le système de la quantité d'énergie qui lui a fallu pour être conçu (implique d'indiquer la durée d'exploitation du système) = TRE (%) x Durée de vie (années)
- « LCOE » est l'acronyme de « Levelized Cost Of Energy », soit en français le « coût actualisé de l'énergie ». Il correspond, pour une installation de production d'énergie, à la somme des coûts actualisés de production d'énergie divisée par la quantité

⁵ Sciences Eaux et Territoires 2012 p.2

<http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles/pdf/Pradel.pdf>

⁶ Vers des indicateurs locaux de performances énergétiques : les étiquettes énergétiques territoriales - Laboratoire TheMA – CNRS UMR 6049 , Convention Ademe - 2009-2013 : Les étiquettes énergies p.3-4 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00912638/document>

d'énergie produite, elle aussi actualisée. Il s'exprime typiquement en c€/kWh et est fréquemment employé pour électricité.⁷

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

n la durée de vie du système
 C_t l'ensemble des coûts
 E_t la production nette d'énergie annuelle
 r le taux d'actualisation annuel

Efficienne environnementale :

- Empreinte écologique : ramène tous les processus physiques dont dépend une activité à un impact sur l'environnement en équivalent d'hectares dégradés.
- Comptabilité/impact/Bilan Carbone® : ramène tous les processus physiques dont dépend une activité à des émissions exprimées en équivalent carbone ou en équivalent CO₂. Cependant, la comptabilisation carbone dépend du cadre qui lui est attribué : la portée de l'étude dépendra de l'intégration ou non de toutes les émissions indirectes d'une structure (impact carbone des fournitures, des activités en amont et en aval de la structure : transport des employés, futur recyclage des produits, etc). La France impose un cadre qui se limite à la comptabilisation des émissions directes (Scope 1).
- Masse d'émissions de gaz à effet de serre (GES) en kg équivalent CO₂ (kg eqCO₂) évité depuis l'installation de la centrale, en considérant celles inhérentes à son cycle de vie, et en comparaison des émissions de GES induites par la production de l'électricité disponible sur le réseau (kg eqCO₂) = (Nombre de kWh produit x Impact carbone de l'électricité du réseau (kg eqCO₂/kWh) - Masse des GES émis par la centrale photovoltaïque sur son cycle de vie (kg eqCO₂))
- Le taux de recyclage
- L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) : Elle permet d'évaluer l'impact environnemental d'un système en dressant l'inventaire des émissions polluantes, des matières premières et de l'énergie sur l'ensemble du cycle de vie de ce dernier (des ressources primaires au traitement des déchets) en considérant⁸ le changement climatique, la destruction de l'ozone stratosphérique, l'acidification des océans, l'eutrophisation, la formation d'agents photo-oxydants (smog), l'atteinte des ressources abiotiques, l'atteinte des ressources biotiques, l'utilisation des terres, l'impact éco-toxicologique, l'impact toxicologique (chez l'humain).

⁷ Connaissances des énergies - "Qu'est-ce que le LCOE ?" - 2016

<https://www.connaissancedesenergies.org/quest-ce-que-le-lcoe-170908>

⁸ Wikipedia - Analyse du cycle de vie - Consulté le 02/02/2019

https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_du_cycle_de_vie#Étapes_d'évaluation_des_impacts

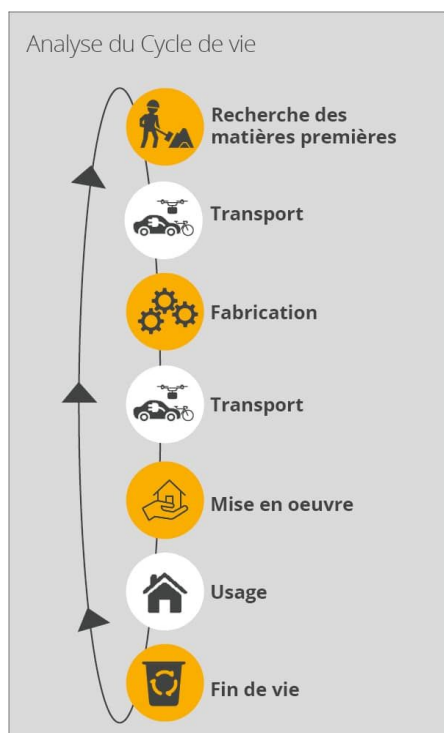
Efficienc e éthique :

- Nombre d'emplois locaux créés par kWc installé
- Nombre d'emplois non locaux créés par kWc conçu (emplois non locaux, concerne les lieux de production des panneaux/accessoires, le transport, l'extraction du silicium)
- Qualité des emplois non locaux créés
- Impacts écologiques, économiques, sociaux au niveau des mines de silicium
- Bénéfices économiques locaux

D'autres indicateurs ont été trouvés au cours de cet état de l'art, leurs visuels sont consultables en annexe 2. Ceux-ci sont utilisés par des sociétés vendant des services ou du matériel utilisés dans la production d'électricité solaire. Ces indicateurs valorisent les données de production des centrales et s'adressent aux professionnels gestionnaires mais aussi aux petits producteurs particuliers. Ils sont le plus souvent associés à des applications propriétaires fonctionnant sur ordinateur ou smartphone. Certains indicateurs précédemment évoqués sont illustrés par ces sociétés.

Examen de l'Analyse du Cycle de Vie de la centrale photovoltaïque

L'Analyse du Cycle de Vie est une méthodologie dont le but est d'évaluer les impacts sur l'environnement occasionnés par la fabrication et l'utilisation d'un produit ou service. Dans cette étude, le système étudié commence aux modules photovoltaïques et va jusqu'au point de raccordement au réseau, tous les éléments constitutifs étant évalués « du berceau à la tombe ». Cette centrale photovoltaïque est installée sur le toit du groupe scolaire d'Albert De Mun situé à Rennes. Le système photovoltaïque, d'une puissance de 36 kWc est constitué de 218m² de panneaux monocristallins de marque Systovi, de micro-onduleurs, de câbles et d'une armoire électrique.



L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) traite les aspects et les impacts environnementaux potentiels tout au long du cycle de vie, de l'acquisition des matières premières à sa production, son utilisation et son traitement en fin de vie.

L'ACV analyse tous les intrants et sortants pertinents pour évaluer les impacts potentiels de ceux-ci, sur l'environnement et la santé humaine.

Il s'agit également d'un outil de comparaison qui permet d'évaluer la charge environnementale de plusieurs produits ou procédés. La méthodologie ACV comprend quatre phases interdépendantes définies par les normes ISO 14040 et ISO 14044 :

1 - La définition des objectifs et du champ de l'étude

Il s'agit d'appréhender les limites de l'étude du système, ce qui est pris en compte et ce qui ne l'est pas.

La ville de Rennes a donné un cahier des charges pour la centrale qui exigeait :

- Une durée de vie de 30 ans pour les modules photovoltaïques.
- Un ratio de performance des modules photovoltaïques de 75 %.
- Un seul remplacement d'onduleur durant la vie du système.

Nous avons complété ces informations et obtenu les références des panneaux et micro-onduleurs afin de pouvoir modéliser le système avec l'aide du logiciel System Advisor Model. Le modèle de panneaux Systovi : V-SYS 250 WC 54 CELL full black ; Les micro-onduleurs : EMPHASE, modèle M215.

2 - La réalisation de l'inventaire du cycle de vie

C'est la compilation et quantification des intrants et des extrants, pour le système au cours de son cycle de vie.

Il est indiqué au chapitre 4, l'utilisation pour la réalisation de la modélisation du système du logiciel d'analyse de cycle de vie SimaPro8.5 et la base de données ecoinvent 3.4.

Les données manquantes, non fournies par le fabricant, notamment celles des panneaux seront substituées par des données génériques (plus restrictives géographiquement par rapport au site concerné) et utilisées en priorité. Les données seront donc adaptées et apporteront des écarts défavorables dans les résultats.

Il est indiqué dans le tableau 2 du chapitre 4.1, la prise en compte de l'éclairage des combles. Nous supposons que cette éclairage est nécessaire à la surveillance et éventuellement à la maintenance des micro-onduleurs peut-être placés en sous toit. L'éclairage de cet espace est-il dans les limites de l'étude ?

Energie produite par le système sur 30 ans

Année N	Rendement	Production en fin d'année N (kWh)	Production moyennée ((N+(N+1)) /2) (kWh)
0	100,00 %	39 626	39626
1	99,20 %	39 309	39 467
2	98,40 %	38 992	39 150
3	97,60 %	38 675	38 833
4	96,80 %	38 358	38 516
5	96,00 %	38 041	38 199
6	95,20 %	37 724	37 882
7	94,40 %	37 407	37 565
8	93,60 %	37 090	37 248
9	92,80 %	36 773	36 931
10	92,00 %	36 456	36 614
11	91,20 %	36 139	36 297
12	90,40 %	35 822	35 980
13	89,60 %	35 505	35 663
14	88,80 %	35 188	35 346
15	88,00 %	34 871	35 029
16	87,20 %	34 554	34 712
17	86,40 %	34 237	34 395
18	85,60 %	33 920	34 078
19	84,80 %	33 603	33 761
20	84,00 %	33 286	33 444
21	83,20 %	32 969	33 127
22	82,40 %	32 652	32 810
23	81,60 %	32 335	32 493
24	80,80 %	32 018	32 176
25	80,00 %	31 701	31 859
26	79,20 %	31 384	31 542
27	78,40 %	31 067	31 225
28	77,60 %	30 750	30 908
29	76,80 %	30 433	30 591
30	76,00 %	30 116	30 274
		Total en kWh :	1 046 126

L'énergie produite par la centrale semble aussi sous-évaluée dans l'ACV. Nous avons donc recalculé et modélisé le productible (Voir annexe 4.) en fonction des paramètres de localisations, d'orientations et des caractéristiques de l'installation (panneaux, onduleurs, câbles...). Nous avons utilisé deux logiciels pour ce calcul de production pour croiser cette donnée, Pvsyst et System Advisor Model. Ils confirment tous deux une majoration de l'ordre de 14% de la production. La puissance produite calculée est de 39 626 kWh la première année au lieu de 35 120 kWh.

L'énergie théorique totale produite par le système pour 30 ans est la somme des énergies produites chaque année en fonction de la dégradabilité des cellules qui est de 20% pour 25 ans. On l'estime linéaire sur 30 ans avec donc une perte de production annuelle de 0,8 %.

Cette perte ne s'appliquant pas dans la réalité sur la production annuelle en fin de chaque année, nous avons moyenné celle-ci pour prendre en compte la progressivité de cette perte.

3 - L'évaluation de l'impact en cycle de vie

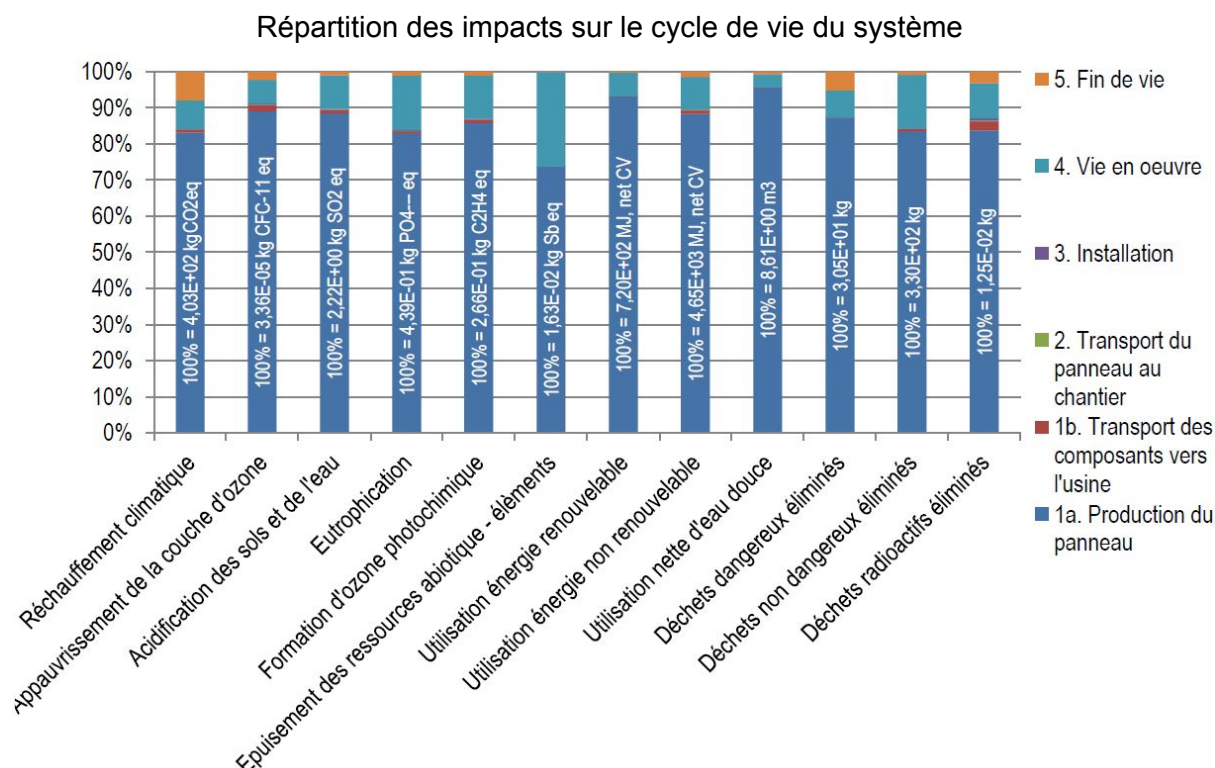
Cette évaluation comprend la compilation et la quantification des flux entrants et sortants du système étudié (ISO14040 : 2006) afin d'évaluer quantitativement les impacts potentiels créés par les systèmes étudiés.

Les indicateurs environnementaux sont sélectionnés parmi ceux définis dans la norme NF EN 15804+A1 et son complément national NF EN 15804/CN.

Treize indicateurs d'impacts environnementaux ont donc été utilisés pour évaluer quantitativement les impacts générés par le système : six indicateurs décrivent l'utilisation des ressources, trois indicateurs décrivent les déchets et quatre indicateurs décrivent les autres flux sortants.

Les deux tableaux 17 et 18 respectivement chapitre 5.2 et 5.3 devraient être liés par un coefficient de 218 (nombre total de m²). Ce n'est pas toujours le cas. Nous avons utilisé le tableau 17 comme référence et appliqué ce facteur de 218 pour retrouver les résultats d'impacts en fonction des étapes du cycle de vie sur l'ensemble du système.

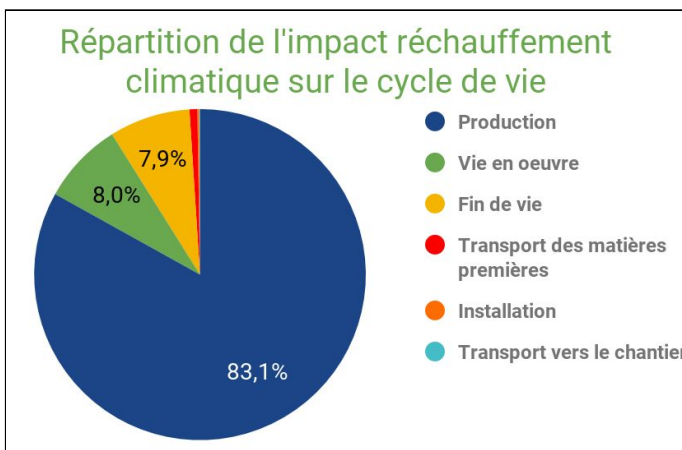
La figure ci-dessous nous montre la répartition des impacts sur le cycle de vie. Nous observons que sur la totalité des indicateurs, la phase de production de panneaux est la plus impactante (entre 73 % et 95 %). Elle induit 83 % des impacts sur l'indicateur qui concerne le réchauffement climatique.



L'impact de la fabrication des onduleurs sur l'indicateur de réchauffement climatique se trouve dans la phase de production mais également dans la phase de vie en oeuvre du fait d'un remplacement prévu dans le cycle de vie. Le recyclage de ses onduleurs et des panneaux est aussi visible dans la phase de fin de vie.

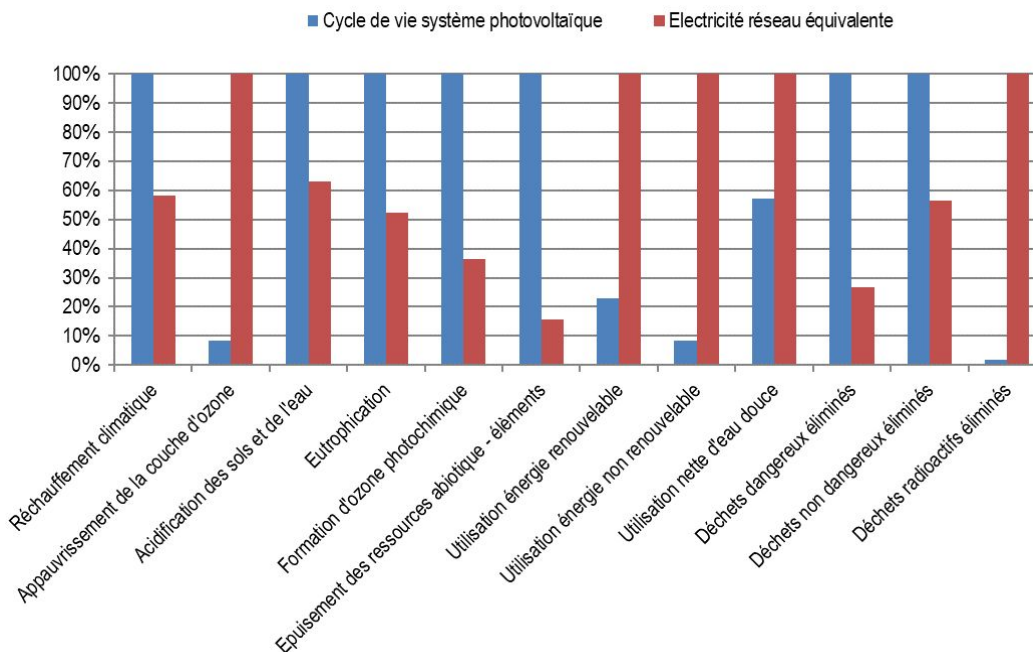
L'impact du transport des matières premières de Chine vers l'usine de Saint-Herblain (en rouge) sur l'indicateur de réchauffement climatique, apparaît comme faible en proportion de l'impact de production du panneau. Ceci doit être aussi imputé à la faible masse des wafers de silicium et des cadres en aluminium.

Le schéma ci-contre reprend les différentes étapes dans le cycle de vie qui impacte l'indicateur de réchauffement climatique que l'on aura particulièrement scruté en raison des répercussions négatives sur certains de nos indicateurs (Temps de Retour Carbone et facteur d'émission). Il souligne le poids de la phase de production sur tous les indicateurs.



La production d'électricité par les panneaux photovoltaïques permet d'éviter le recours à l'électricité du réseau. Le graphique ci-dessous permet de comparer l'impact en cycle de vie du système à l'impact associé à la consommation électrique équivalente à la production. Il est étonnant de constater que le système est plus impactant sur 7 des 12 indicateurs.

Comparaison ACV système photovoltaïque et approvisionnement réseau équivalent



Une estimation du Temps de Retour Énergétique à été réalisée lors de cette ACV. Alors que le résultat est habituellement compris entre 2 et 3,5 ans sur les panneaux solaires monocristallins récents, l'ACV nous donne un TRE de 10,6 ans !

4 - L'interprétation des résultats

L'une des informations importantes dans l'ACV est que le fabricant n'a pu transmettre un certain nombre de données. Celles-ci sont substituées par des données génériques plus pénalisantes. La base de données Ecoinvent 3.4 a été utilisée à cet effet. Le rédacteur a d'ailleurs indiqué dans l'ACV que *“les composés identifiés des matières premières ont été approximés par des matières issues de bases de données.”*

Il est important de noter que ces “imprécisions” affectent les matières premières lors de la phase de production. Cette phase représente entre 73% et 95% des impacts en fonctions des indicateurs concernés. L'indicateur de réchauffement climatique est quant à lui affecté pour une large part (83%) par ces données génériques défavorables.

Ces “approximations” dans les ACV par manque de données communiquées par les fabricants ne semblent pas être rares. En effet, Irina Khodossova, Directrice Innovation de Solstyce, société d'ingénierie et de services experte en matière d'analyses carbone de l'industrie photovoltaïque déclarait en février 2019 « Sans déclaration environnementale spécifique, les bureaux d'études techniques et architectes sont contraints d'utiliser des valeurs par défaut particulièrement pénalisantes pour les modules photovoltaïques, ce qui empêche l'aboutissement de certains projets »⁹.

L'auteur de l'ACV le confirme : *“l'utilisation des données génériques est reconnue comme défavorable, ici pour la fabrication des cellules photovoltaïques, et au-delà du Wafer de Silicium, qui représente la majeure partie des impacts.”*

Cette information peut expliquer, au moins en partie, que l'on puisse observer des résultats sortant des moyennes constatées sur des systèmes équivalents. La conséquence est la dégradation des principaux résultats sans pouvoir néanmoins en mesurer quantitativement l'impact précisément.

Consciente de ce problème, l'Europe va apporter des modifications réglementaires afin de contraindre les fabricants de panneaux solaires à une déclaration environnementale PEP (Profil Environnemental Produit). Les exigences carbone sont au cœur de la nouvelle réglementation environnementale RE2020. La stratégie bas carbone vis-à-vis des modules photovoltaïques ne se limitent pas au marché des appels d'offres de la CRE (Commission de régulation de l'énergie), ni d'ailleurs à la France, elle va concerner tous les projets de constructions neuves. En 2020, l'empreinte carbone sera réellement prise en compte sur l'ensemble du cycle de vie à travers le référentiel Energie+ Carbone- (E+C-).

En outre, le productible de la centrale solaire ayant été ré-estimée à la hausse (Voir annexe 4.) par rapport à l'ACV, nous re-calculerons le Temps de Retour Énergétique ainsi que deux autres indicateurs : Le Temps de Retour Carbone et le facteur d'émission du système.

⁹ Solstyce, Irina Khodossova, Directrice Innovation irina - PEP (Profil Environnemental Produit) : *Les marchés européens exigent la performance carbone*
http://www.solstyce.fr/images_event/SOL_STYCE_Communiq  %20de%20presse%20PEP_2019.pdf

Examen du Plan Climat Air Énergie Territorial de Rennes Métropole

Le Plan Climat Air Énergie Territorial est un outil de planification qui a pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre, d'améliorer l'autonomie énergétique et de s'adapter au changement climatique. Sa réalisation est obligatoire pour toutes les intercommunalités de plus de 20 000 habitants.

L'analyse de ce PCAET 2018-2024 doit nous permettre de faire un bilan énergétique de la Métropole : analyser ses consommations, ses productions d'énergies renouvelables, ses perspectives d'évolutions et ses engagements en matière de transition énergétique. Avec ce bilan, nous ferons des suggestions pour mieux intégrer l'électricité photovoltaïque dans la politique énergétique de Rennes, et nous pourrons nous en servir pour la création d'indicateurs.

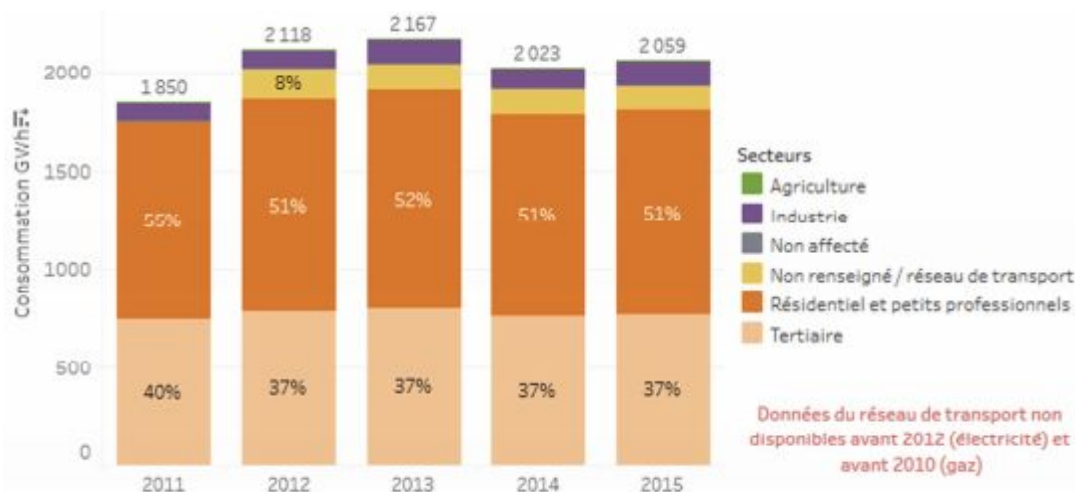
Cette analyse est conduite de manière à faire une synthèse des consommations d'énergie, des productions d'énergie, des perspectives et engagements en matière d'énergie, et ce en affinant l'analyse des énergies aux énergies électriques renouvelables.

Vous retrouverez le-dit Plan Climat sur le site de Rennes Métropole :

https://metropole.rennes.fr/sites/default/files/inline-files/PCAET_RM.pdf

Dans le cadre des engagements pris par Rennes à travers son PCAET, la priorité est mise sur la diminution de la dépendance aux énergies fossiles et ainsi sur la diminution de la pollution qui leur est associée. Ainsi, Rennes Métropole s'engage principalement à rénover des bâtiments énergivores, à augmenter l'utilisation des transports publics qui seraient eux-mêmes convertis à l'électricité, à développer un réseau de chauffage beaucoup moins polluant grâce à la méthanisation et la valorisation des déchets.

En 2010, 70% de l'énergie consommée sur le territoire rennais était directement d'origine fossile, le mix énergétique était ainsi : 39% produits pétroliers, 29 % gaz, 25 % électricité, 3% réseau de chaleur, 2% bois, 1 % GPL, 1% autre. Ces énergies étaient ainsi réparties : 33% résidentiel, 24% transport de voyageurs, 22% tertiaire, 10% industrie, 9% fret, 2% agriculture.

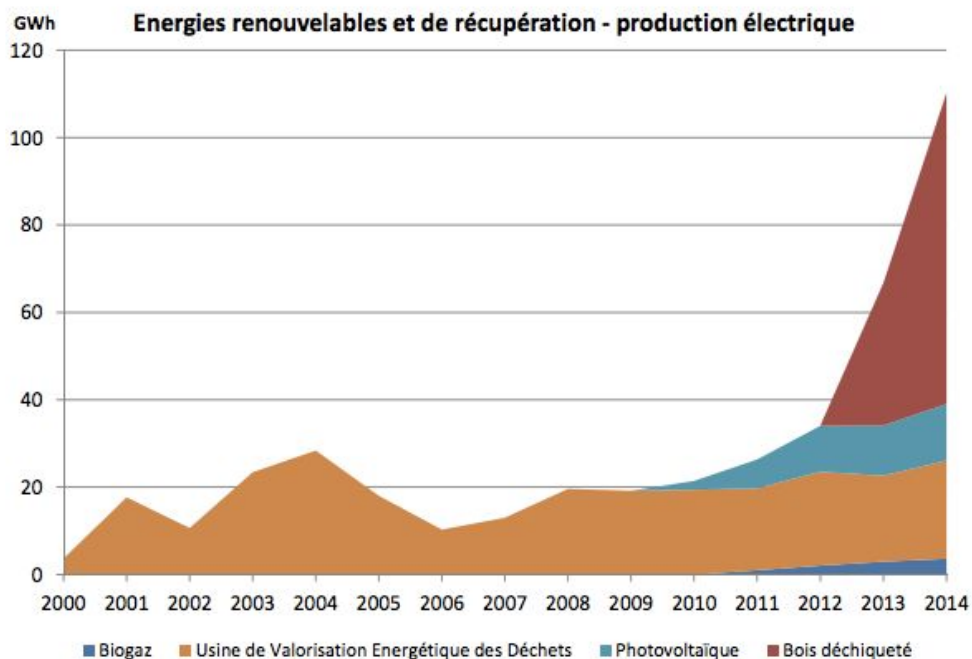


10

¹⁰ PCAET Rennes Métropole 2018-2024, Énergie, Les consommations d'énergie - L'électricité p.20

La consommation annuelle en électricité de Rennes Métropole est d'environ 2 100 GWh, elle est ainsi répartie en 2015 : 51% au résidentiel et petits professionnels ; 37% au tertiaire ; environ 6% à l'industrie (en hausse en 2017) ; environ 5% au réseau de transport ou autre (non renseigné) ; <1% à l'agriculture. La moitié de ces consommations est destinée à 3 330 "gros consommateurs" (abonnement > 36 kVA) qui ne représentent qu'1% du nombre de consommateurs. Les foyers consomment 2800 GWh d'énergie, dont 700 GWh (¼) pour l'utilisation classique d'électricité et 546 GWh (26 % des consommations de chauffage qui elles représentent ¾ de 2 800 GWh) pour du chauffage électrique. Soit environ 1 300 GWh d'électricité sont consommés par les foyers.

En 2014, 10% des consommations (hors carburants) étaient d'origine renouvelable et de récupération (445 GWh de chaleur (80%), 110 GWh d'électricité (20%)). L'usine de valorisation énergétique à Villejean et l'usine de cogénération biomasse (au bois déchiqueté, sur le site des Boëdriers) sont à l'origine de près des deux tiers (63%) de cette production. L'utilisation de bois (bûches et granulés) chez les particuliers équivaut à un quart de la production totale, soit l'équivalent de 130 GWh de chaleur.



En se concentrant sur la production d'électricité d'origine renouvelable, on observe qu'en 2014 Rennes Métropole produisait 5,5 % de sa consommation d'énergie électrique (110 GWh). Cette électricité est produite par l'usine de cogénération biomasse (bois déchiqueté) à hauteur d'environ 63%, le deuxième poste de production d'électricité est l'usine de valorisation énergétique des déchets, à hauteur d'environ 20%. Ensuite vient le photovoltaïque à environ 13% et le biogaz à environ 4%. En 2015, 1 269 installations photovoltaïques ont produit 13,6 GWh. La méthanisation est peu présente sur Rennes Métropole avec deux installations de production de biogaz (une agricole à Gévezé, et une liée au traitement des boues sur l'usine d'assainissement de Beaurade), elles produisent actuellement 3,6 GWh d'électricité par an (et 7,1 GWh de chaleur).

¹¹ PCAET Rennes Métropole 2018-2014, Énergie, La production locale d'énergie p.23

Pour ce qu'il en est du développement des énergies renouvelables, Rennes prévoit de tripler sa production locale, soit atteindre environ 1 665 GWh, chauffage et électricité confondu, pour 2030. La Métropole mise donc sur le développement de son réseau de chauffage grâce à la méthanisation et à la valorisation des déchets (atteindre 100% de déchets valorisés pour 2024). Également, pour 2024 il est prévu que 25% des besoins en électricité soit acheté, et provenant de ressources renouvelables. Grâce à ce dernier point, Rennes s'est engagé à ce que tout ses bâtiments publics soient alimentés en énergies renouvelables d'ici 2020¹², et qu'ils soient passifs ou à énergie positive pour 2024. Aussi, une société d'économie mixte Energi'V a été créée¹³, avec le Syndicat Départemental d'Énergie 35, Rennes Métropole et le Département 35, pour soutenir financièrement des projets locaux (public, privé, citoyens ou associatifs) qui ne seraient pas soutenu par des investisseurs privés car pas assez rapidement rentable. Puis, un cadastre solaire permettant aux citoyens et professionnels de Rennes Métropole d'identifier le potentiel énergétique de leurs toitures a été mis en ligne¹⁴. Aussi, Rennes Métropole mise grandement sur l'isolation et la rénovation d'infrastructures publics ou privés. Autrement, le potentiel petit éolien (4 MW) et solaire photovoltaïque (1 MW) local est à l'étude, l'adaptation de la réglementation locale de l'urbanisme pour faciliter ces projets est en cours de réflexion.

Plus précisément, Rennes Métropole envisage d'atteindre 75 à 90 GWh de production d'électricité grâce au photovoltaïque pour 2030, et d'installer une éolienne produisant 25 GWh annuel prochainement. Les premiers projets de Energi'V auraient identifié un potentiel de production de 123 GWh annuel pour Rennes Métropole et le département. Un barrage hydro-électrique à Rophémel devrait être relancé par la Collectivité Eau du Bassin Rennais (Rennes Métropole et 13 autres communes environnantes) pour produire 2,5 GWh/an. Cette collectivité étudie aussi la faisabilité de mise en oeuvre de micro-turbines sur ses installations : utilisation de la différence de hauteur entre les deux réseaux de distribution de la Ville de Rennes et turbinage des débits réservés à l'aval de deux des trois barrages de la Collectivité. Enfin, dans le cadre de la réalisation d'un inventaire du potentiel énergie renouvelable sur le patrimoine de la métropole, 3,6 MWh d'électricité issu du photovoltaïque est à l'étude sur les casiers de l'ISDND (Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux, qui permettent aussi la production de biogaz à Beaurade). Dans le cadre de cet inventaire, le potentiel de production d'énergie renouvelables serait croisé avec les optimums production/coût et de potentiels opérations d'autoconsommation collective. En effet, la métropole permet la réflexion et le soutien au développement de l'optimisation de la gestion de l'énergie (smart grid) et de l'autoconsommation mutualisée, comme à Ker-Lann.

Pour ce qu'il en est des perspectives d'évolution des consommations d'électricité de la ville de Rennes, elles sont plutôt défavorables. En effet le réseau de transport en commun de la ville de Rennes va majoritairement s'électrifier, évidemment cela est bien pour amoindrir la

¹² Article de presse, Bretagne économique - *Électricité verte : à Rennes, Enercoop remporte un marché de 35 bâtiments municipaux* - Consulté le 03/03/2019
<https://www.bretagne-economique.com/actualites/electricite-verte-rennes-enercoop-remporte-un-marche-de-35-batiments-municipaux>

¹³ Le Blog des Institutionnels "Naissance d'Energi'V, SEM dédiée aux énergies renouvelables"
<https://leblogdesinstitutionnels.fr/2018/09/13/rennes-metropole-naissance-denergiv-sem-dediee-aux-energies-renouvelables-metropolerennes>

¹⁴ Cadastre solaire, Rennes Métropole et In Sun We Trust <https://rennes-metropole.insunwetrust.solar>

dépendance de la ville de Rennes aux énergies fossiles et limiter son impact carbone, mais cela va engendrer une hausse des consommations locales en électricité et rendre plus difficile l'autonomie énergétique électrique. Cela est induit par la nouvelle ligne de métro pour 2020 : elle comportera 25 rames (pour comparaison, le métro A consommait 21 000 kWh par jour avec 24 rames en incluant de la récupération d'énergie¹⁵, aujourd'hui ce métro a 30 rames, on peut lui estimer sa consommation annuelle de 8 à 9 GWh). Aussi, le réseau de bus devrait être remplacé à hauteur de 80% par des bus tout électrique (motorisation et chauffage) pour 2030, cela représenterait 250 bus diesel remplacés par des bus électriques. Une restructuration majeure du réseau de bus semble prévu, car les 70 % de bus électriques prévues pour 2024 correspondent à 75 bus. En outre, Rennes Métropole prévoit 85% de voyages supplémentaires sur le réseau STAR pour 2030, ce qui devrait augmenter en principe le nombre de bus en ville et en périphérie, bien que la nouvelle ligne de métro déplacerait l'exploitation de bus de plusieurs lignes. Les bornes de rechargement des bus seront installées aux dépôts. Rennes prévoit également que 20 % du parc de véhicules automobiles soit électrique pour 2030, 5 % à l'hybride rechargeable. Leurs rechargements passerait par l'une des 101 bornes en accès publique, ou chez les particuliers et entreprises. D'après les données de l'Open Data Rennes, la consommation d'électricité augmente sensiblement. Cela est majoritairement dû aux usines, et aussi au tertiaire, qui consomment de plus en plus d'électricité¹⁶, et possiblement à la population qui croît d'environ 1,4 % par an¹⁷ (426 502 habitants en 2013, 438 865 en 2015, 454 931 en 2019)¹⁸.

Les perspectives de diminution des consommations d'électricité sont assez faibles, sauf pour les logements/bâtiments "très énergivores" au chauffage électrique qui seront isolés ou rénovés d'ici 2030. Hormis la rénovation de l'éclairage public (75 000 points lumineux dont la consommation va être diminué), Rennes n'a pas d'autres engagements précis sur la diminution des consommations d'électricité sur sa métropole. Les autres perspectives passent pas des campagnes de communication : communication et d'animation pour des réductions de consommation d'électricité chez les agriculteurs locaux dès 2019 ; développement d'un plan de communication sur le climat et la transition énergétique ; créer la conférence locale de la transition énergétique. Rennes a l'ambition tout de même d'élaborer des Plan d'Actions Énergie pour chacune de ses 43 communes.

Le PCAET ne présente pas une trajectoire assez détaillée des prévisions de production d'énergie locales (chaleur ou électricité, et méthanisation ou hydraulique ou déchets, etc). Évidemment ces données ne sont pas évidentes à quantifier, mais le rapport plus précis entre prévision de la production d'électricité ou de chaleur serait utile. Également, le plan ne

¹⁵ Article presse, 20 minutes *Le métro enfile ses habits écolo* - Consulté le 03/03/2019

<https://www.20minutes.fr/rennes/638733-20101214-rennes-le-metro-enfile-habits-ecolo>

¹⁶ Data Rennes Métropole, Consommation électrique annuelle à la maille commune, données "Conso totale Industrie (MWh)" et "Conso totale Tertiaire (MWh)"

<https://data.rennesmetropole.fr/explore/dataset/consommation-electrique-annuelle-a-la-maille-commune/>

¹⁷ Rennes Métropole, "Le chiffre de la semaine : 454 931"

<https://metropole.rennes.fr/le-chiffre-de-la-semaine-454-931>

¹⁸ Rennes Métropole "chiffres clés" 2016, p.6 ; INSEE, Comparateur de territoires - Rennes Métropole

https://www.audiar.org/sites/default/files/documents/observatoires/web_2016chiffres_cles_rm.pdf ;
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=EPCI-243500139>

mentionne pas les ambitions globales de la ville de Rennes, à savoir si la métropole souhaite s'orienter vers une autonomie totale ou partielle, si elle veut valoriser et étudier des capacités locales de gestion de l'énergie (potentiel de stockage, optimisation des consommations en fonction de la production). Enfin, son opinion vis à vis de l'électricité d'origine nucléaire n'est pas explicitée. Aussi, on peut trouver dommage que le potentiel d'utilisation de l'hydrogène comme système de stockage et de carburant ne soit pas considéré, en retenant simplement l'absence d'excédent de production électrique renouvelable sur le territoire. En effet, on pourrait imaginer des projets de coopération avec des communes alentours et la recherche universitaire pour développer ces moyens de stockage. D'autant plus que des événements de présentation de l'hydrogène ont occasionnellement lieu sur Rennes (événement InOut, conférence Espace des Sciences).

Pour ce qu'il en est de la gestion de l'électricité renouvelable à l'échelle de Rennes Métropole, nous aimerions proposer quelques améliorations. L'électricité photovoltaïque, qui produit au maximum en milieu de journée, pourrait être valorisée pour répondre aux besoins du tertiaire et des usines très dépendant de l'électricité tout au long de la journée. Aussi, des consommations pourraient être déplacées de la nuit ou des moments de pics de consommation (matin et soir) vers le milieu de la journée, comme l'utilisation d'électro-ménager au sein des foyers, ou surtout comme l'utilisation de systèmes (pompes, rechargement de véhicules, etc...) au sein des industries, des entreprises tertiaires, des hôpitaux, des stations d'épurations des eaux usées, des transports en commun, de la Collectivité Eau du Bassin Rennais, etc... Pouvoir recharger les bus électriques au moment des pics de production d'électricité photovoltaïque serait une bonne initiative, en effet la fréquentation des bus est plus faible en milieu de journée, au moment où le potentiel solaire est élevé. Autrement, Rennes pourrait valoriser ses installations hydroélectriques et ses stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) pour y stocker les futures productions de nuit d'électricité d'origine éolienne ou de jour pour le photovoltaïque, et les ré-injecter aux moments des pics de consommation du matin et du soir. Cela impliquerait de prévoir des systèmes de pompage-turbinage sur ses barrages existants ou futurs.

Réalisation d'indicateurs

Le Temps de Retour Énergétique (TRE)

Cible : jeunesse et citoyens rennais - Efficience environnementale

Le temps de retour énergétique (TRE) est un indicateur particulièrement pertinent pour caractériser la performance des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, le solaire photovoltaïque se caractérise par un investissement énergétique important en phase de fabrication et une très faible consommation énergétique en phase d'utilisation.

Le temps de retour énergétique détermine le temps nécessaire pour qu'un système produise une quantité d'énergie primaire équivalente à celle qui a été nécessaire sur son cycle de vie. Il s'exprime en années et correspond au ratio entre l'énergie consommée pour le système sur l'énergie moyenne produite par le système sur une année.

Cette dernière est comparée à l'énergie primaire nécessaire pour produire l'énergie électrique équivalente du pays où le système renouvelable est installé. En France il faut 2,58 kWh d'énergie primaire pour fournir 1 kWh à la prise (nous reviendrons sur ce facteur de correction). Le TRE est donc un calcul spécifique au bouquet électrique du pays concerné.

$$TRE = \frac{\text{Énergie consommée (fabrication transport installation...)}}{\text{Énergie produite en un an} \times 2,58 \text{ (équivalent énergie primaire réseau électrique français)}}$$

Le calcul du TRE présenté sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) omet cette conversion de l'énergie produite en énergie primaire équivalente (soit un facteur de 2,58 pour la France).

L'énergie produite par la centrale semble aussi sous-évaluée dans l'ACV. Nous avons donc recalculé et modélisé ce productible (voir annexe 4) en fonction des paramètres de localisation, d'orientation et des caractéristiques des matériaux installés (panneaux, onduleurs, câbles...). La puissance produite calculée est de 39 626 kWh la première année au lieu de 35 120 kWh.

La perte de rendement dû au vieillissement des cellules est estimée à près de 0,8 % chaque année. Elle est supposée être linéaire sur toute la durée de vie du système. Par simplification, nous prendrons pour le calcul du TRE, comme énergie produite en un an, une moyenne annuelle des quatre premières années de production soit 38 992 kWh.

$$38\,992 \text{ kWh} \rightarrow 38\,992 / 218 \text{ m}^2 = 178,86 \text{ kWh} / \text{m}^2 \rightarrow 643,90 \text{ MJ} / \text{m}^2$$

L'équivalent en énergie primaire (réseau électrique français) produit par le système sur une année sera donc = $643,90 \times 2,56 = 1\,661 \text{ MJ} / \text{m}^2$

La consommation d'énergie cumulée sur l'ensemble du cycle de vie du système étant de **5370 MJ / m²**, nous avons donc un temps de retour énergétique de :

$$TRE = \frac{\text{Énergie consommée (MJ / m}^2\text{)}}{\text{Énergie primaire produite en un an (MJ / m}^2\text{)}} = \frac{5370}{1661} = 3,23 \text{ ans}$$

La conversion pour l'électricité réseau en France : un facteur de 2,58

L'électricité est l'énergie la plus utilisée en France (plus de 40 % des consommations totales). Mais c'est aussi l'énergie qui nécessite le plus de transformation. Actuellement, en France, un facteur de conversion normalisé de 2,58 est utilisé.

Cela signifie qu'un 1 kWh_{EF} = 2,58 kWh_{EP}

Nous allons maintenant voir comment a été calculé ce coefficient.

Voici d'abord schématiquement, le "mix" énergétique de la production d'électricité ainsi que le rendement de chaque pro :

Type d'énergie	Rendement (%)	Part de la production (%)
Nucléaire	33	75
Énergies renouvelables	100	15
Énergies fossiles	38	10

Il faut ensuite faire un calcul de proportionnalité pour trouver un rendement de 43,6% ce qui correspondrait à un coefficient de 2,30.

Mais nous n'avons pris que le rendement des centrales. Il faut aussi prendre en compte les pertes sur le réseau de distribution électrique. Si RTE (Réseau de Transport de l'Électricité) estime les pertes (en énergie primaire) sur les lignes hautes (et très hautes) tensions à 3%, les pertes seraient plus de l'ordre de 5 à 7% (les pertes augmentent en basse tension et les transformateurs ont eux aussi un rendement de transformation).

En prenant des pertes en ligne à 5%, cela correspondrait à un rendement global de 38,5%, ce qui donne un coefficient d'environ 2,58.

Le taux de conversion des autres énergies est de 1 (énergie primaire = énergie finale).

Les conversions énergie primaire/finale permettent de pouvoir mieux comparer 2 installations utilisant deux sources d'énergie différente. Cependant, les conversions sont toujours attaquables et font l'objet de lobbying aux moments de les établir.

La comparaison au Livret A

Cible : Citoyens rennais - Efficience : financière

Il s'agit pour cet indicateur d'évaluer le taux de rémunération financière d'un investissement dans une installation photovoltaïque, et de le comparer au taux largement connu et médiatisé du Livret A.

Nous avons voulu que cette formule puisse s'adapter aux différents types de raccordement des centrales (autoconsommation, revente), c'est pourquoi le numérateur comprend aussi bien les gains liés à la revente d'électricité que les gains liés à l'économie induite en ayant évité l'achat d'un kWh sur le réseau au moment où on aura autoproduit et autoconsommé le sien. Selon le mode de raccordement au réseau, on peut considérer l'un ou l'autre type de bénéfice financier, ou les deux.

Taux de rémunération (%) =

$$\left(\frac{(\text{kWh vendus} + \text{Gains kWh non achetés car autoproduits}^*) \text{ sur X ans}^{**} - 1}{\text{Investissement initial} + \text{Coûts sur X ans}} \right) \times 100$$

*en intégrant l'évolution du coût de l'électricité, + 3%/an selon l'ADEME

**durée déterminé du prêt citoyen

Taux de rémunération du livret A = 0,75 % (jusqu'au 31 janvier 2020)

Applications :

- Pour une installation en revente totale à 10cts d'euro le kWh, qui produit en moyenne 40 000 kWh par an sur 20 ans, qui a coûté 70 000 euros et qui nécessite 5 000 euros de frais sur 20 ans, on aura un taux de rémunération de 14,3 % :

$$\text{Taux de rémunération} = \left(\frac{(0,10 \times 40\,000 \times 20) - 1}{70\,000 + 5\,000} \right) \times 100 = 6,7 \%$$

soit 6,7 / 0,75 = 99 fois plus élevé que le taux du Livret A.

- Pour cette même installation en autoconsommation et revente de surplus, qui revend 25 000 kWh par an de sa production à 6cts d'euros, et qui autoconsomme 15 000 kWh par an, le tout sur une durée de 20 ans. En estimant que le prix du kWh était à 15 cts d'euro la première année, et qu'il augmente de 3% par an (sur 20 ans il sera en moyenne à 20,5 cts d'euro¹⁹). On aura un taux de rémunération de 30,7 %.

$$\text{Taux de rémunération} = \left(\frac{(0,06 \times 25\,000 + 0,205 \times 15\,000) \times 20 - 1}{70\,000 + 5\,000} \right) \times 100 = 22 \%$$

soit 22 / 0,75 = 29 fois plus élevé que le taux Livret A.

Les chiffres estimés dans ces simulations ne sont que des approximations des coûts réels d'une installation photovoltaïque, il ne sont pas exhaustif.

¹⁹ Voir Excel de calculs fourni - Annexe 3



Pour illustrer cet indicateur, on pourrait comparer un billet sur lequel serait inscrit "Livret A" et un billet sur lequel serait inscrit le nom de la centrale photovoltaïque concernée. Ainsi, le rapport entre les tailles des 2 billets serait proportionnel au rapport entre le taux du Livret A et le taux de l'investissement dans la centrale photovoltaïque.

Le Temps de Retour Carbone (TRC)

Cible : public averti - Efficience environnementale

Le Temps de Retour Énergétique ne prend pas en compte la teneur en carbone de l'électricité avec laquelle l'installation a été fabriquée et recyclée. Par analogie au TRE, on peut utiliser un autre indicateur, plus adapté à priori pour quantifier l'impact de l'installation sur la production de Gaz à effet de serre (GES) : le Temps de Retour Carbone.

Nous appelons temps de retour carbone, le temps nécessaire pour qu'une installation photovoltaïque, par la substitution de l'électricité produite à l'électricité locale, permette d'éviter les émissions de GES qui ont été nécessaires à sa fabrication, à son installation, à sa maintenance et à sa fin de vie.

L'ACV nous montre que sur la durée de vie de la centrale photovoltaïque (30 ans), elle aurait émis 403 kg de CO₂ équivalent par m² de panneau photovoltaïque soit 403 x 1 000 x 218 = **87 854 000** g CO₂ équivalent sur l'ensemble de la centrale solaire.

La production de la centrale solaire d'Albert de Mun que nous avons recalculée est estimée sur la durée de vie (30 ans) à 1 046 126 kWh, la production moyenne sur 1 an sera donc de 1 046 126 / 30 = 34 871 kWh

Les émissions de CO₂ par kWh du mix électrique français en 2018 selon l'ADEME étant estimées à 57 gCO₂/kWh, nous obtenons chaque année une économie de 34 871 x 57 = **1 987 647** gCO₂/ans

$$TRC = \frac{\text{Émission de CO}_2 \text{ sur le cycle de vie du système}}{\text{Économie annuelle de CO}_2 \text{ (non consommé sur le réseau)}} = \frac{87854000}{1987647} = 44 \text{ ans}$$

Le temps de retour carbone peut sembler important pour la centrale solaire d'Albert De Mun mais traduit d'abord une différence importante du mix énergétique utilisé pendant le cycle de vie et celui du réseau électrique Français.

En effet, la consommation d'énergie lors de la production du wafer de Silicium constitue une part importante de l'impact carbone du système et cette énergie est encore fortement carbonée (utilisation du charbon et autres énergies fossiles) en Chine.

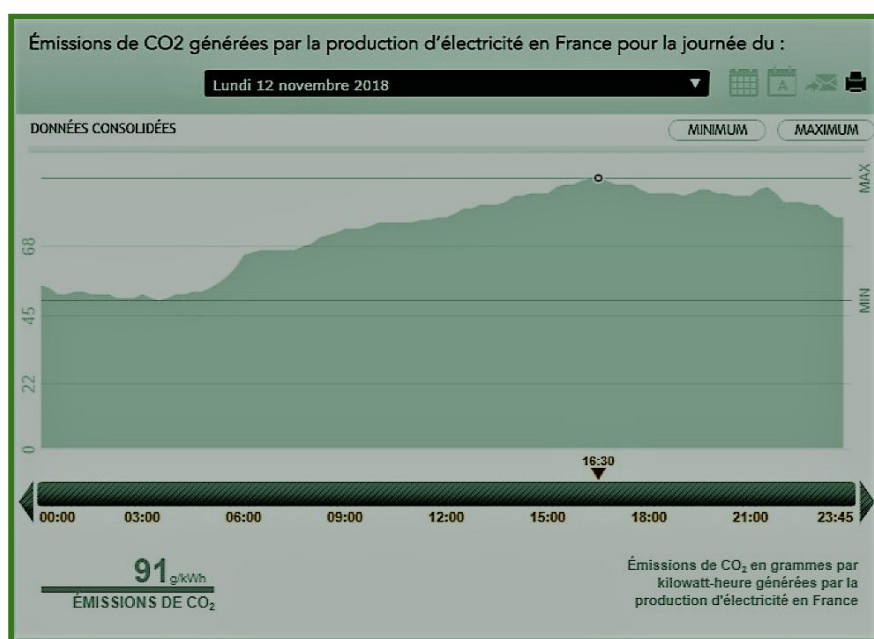
Le réseau électrique français, constitué schématiquement de 75 % de nucléaire, 15 % d'EnR et de 10 % d'hydrocarbure, est crédité d'un faible contenu carbone.

Cette valeur du TRC met donc surtout en lumière le faible contenu en carbone de l'électricité produite en France et à l'inverse l'importance du coût carbone du mix électrique chinois.

Pour cette technologie de panneaux photovoltaïque, le TRC est en générale plutôt de l'ordre d'une vingtaine d'années (fabriqué en chine, utilisation en France). Ceci peut montrer la pénalisation des données génériques substituées aux données manquantes du fabricant.

Suite aux travaux menés par le groupe de travail « Électricité » mis en place par l'ADEME courant 2017-2018, une mise à jour importante a été réalisée afin de mieux prendre en compte l'impact des imports/exports et mettre à jour le contenu CO2 moyen européen par kWh. Ainsi, la méthode utilise désormais les soldes importateurs et exportateurs, heure par heure et le contenu CO2 européen par kWh de l'AIE. Le calcul du contenu CO2 moyen²⁰ en France se base donc depuis 2018 sur la formule suivante :

$$\frac{\text{émissions CO}_2 \text{ du mix français} + \text{émissions CO}_2 \text{ du solde importateur} - \text{émissions CO}_2 \text{ du solde exportateur}}{\text{Production d'électricité du mix français} + \text{solde importateur} - \text{solde exportateur}}$$



Malgré cette avancée récente, le contenu moyen du mix électrique français (57 gCO₂/kWh) ne tient pas compte de la variabilité du contenu en CO₂ du kWh en fonction des saisons ou des heures de la journée. Cette valeur évolue pourtant selon le niveau de demande en électricité et les centrales subséquentement enclenchés.

De même on peut considérer que l'énergie du photovoltaïque ne se substitue pas à l'énergie de base, faiblement émettrice en France, mais aux énergies de semi-base et de pointe très fortement carbonées.

En effet, en France, les émissions de CO₂ de la production d'électricité varient fortement selon que l'on considère la moyenne annuelle (57g) sur l'ensemble des moyens de production, les émissions des seuls parcs nucléaires et renouvelables (sans émissions directes), ou la production du parc de centrales gaz ou charbon (de l'ordre de 350 à 950

²⁰ Contenu CO₂ moyen de l'électricité en France, 2018

http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?electricite_reglementaire.htm

gCO₂/kWh en émissions directes). Ceci conduit de fait à des variations saisonnières importantes du contenu en CO₂ du kWh livré sur le réseau.

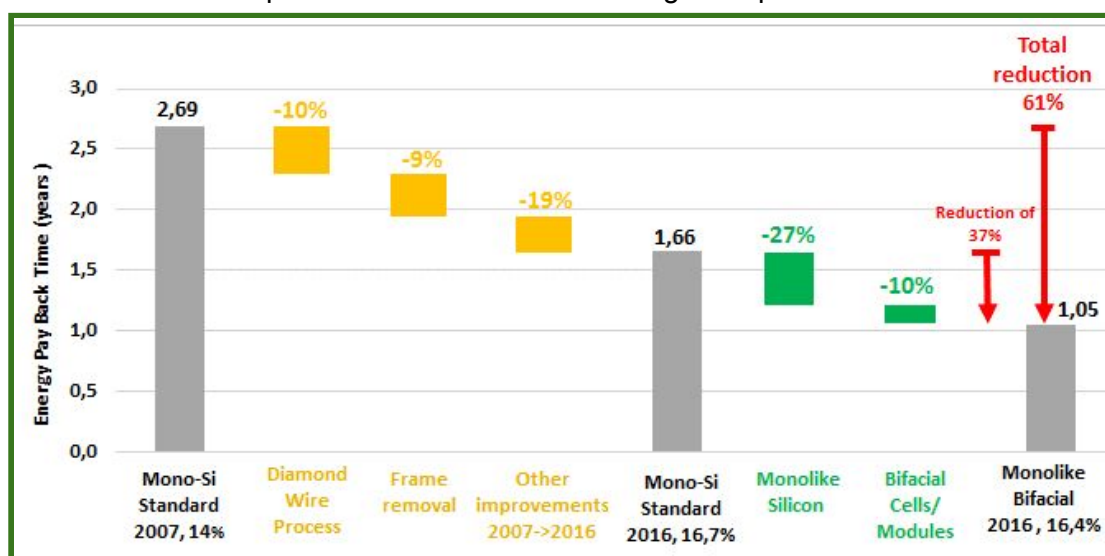
La valeur calculé de ce TRC avec les données de substitution défavorable de l'ACV doit être fortement dégradée.

Pour toutes ces raisons, il est peu pertinent de tenir compte de cet indicateur en l'état alors qu'il est étrangement souvent utilisé en France pour qualifier les ENR et le photovoltaïque en particulier.

Pour finir sur ce point, nous devons dire que le TRC n'est pas complètement dénué d'intérêt et met en évidence :

- L'impact du pays de fabrication sur le coût énergétique des cellules fabriquées (x10 Chine/France).
- L'impact des technologies et process de fabrication (production bas carbone de lingots et de plaquettes de silicium).
- L'importance du choix des cellules photovoltaïques, notamment le rapport rendement/coût énergétique des monocristallins, polycristallins ou amorphes.

Réduction du TRE par l'amélioration des technologies et procédés de fabrication PV



L'amélioration des technologies influent sur le TRE, le TRC et le facteur d'émission. les études ACV menées dans le cadre de la thèse de Nouha Gazbour²¹ ont permis de mettre en évidence le gain notable apporté par les technologies Monolike et Bifaciale.

²¹INES, Thèse en cours de Nouha Gazbour « Analyse de Cycle de Vie comme outil de pilotage pour le développement de PV plus respectueux de l'environnement » - 2016-2018
www.ines-solaire.org/fr/ines-2-2/recherche-et-innovation/theses-en-cours/developpement-dune-methode-pour-orienter-les-choix-technologiques-dans-les-projets-de-recherche-lanalyse-de-cycle-de-vie-comme-outil-de-pilotage-pour-le-developpement-d/

Impact carbone : le facteur d'émission

Cible : jeunesse et citoyens rennais - Efficience environnementale

Si le temps de retour carbone ne répond pas à nos attentes, nous pouvons néanmoins calculer le facteur d'émission en gCO₂/kWh de la centrale solaire Albert De Mun. D'après les émissions de CO₂ proposées par l'ACV et les nouvelles données de productible, l'impact carbone est donc :

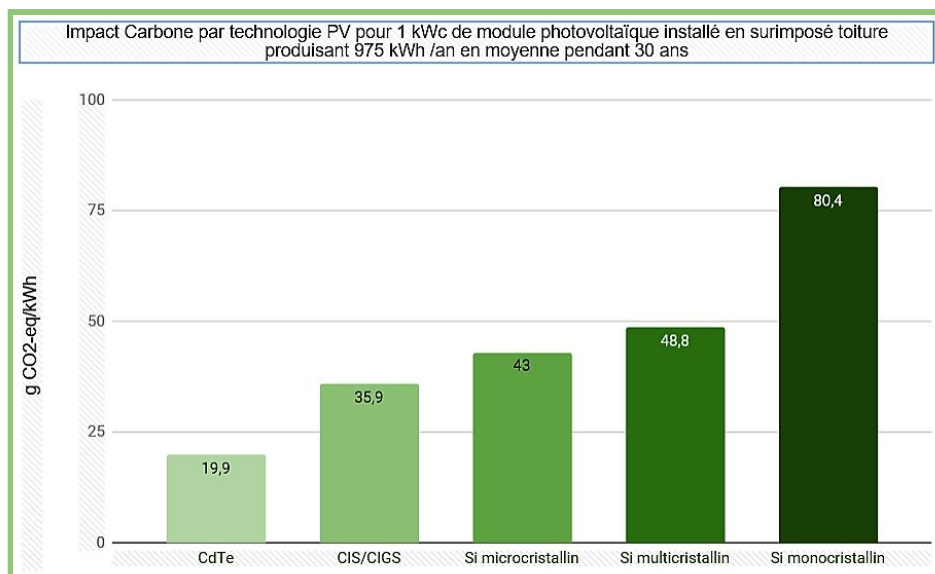
$$\frac{\text{Émission en gCO}_2 \text{ sur le cycle de vie du système}}{\text{Production totale en kWh sur 30 ans}} = \frac{87854000}{1046126} = 84 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

La valeur moyenne retenue par l'ADEME pour le solaire photovoltaïque est de 55 gCO₂/kWh, elle reste conforme aux résultats d'une étude menée en 2011 sur des ACV de systèmes photovoltaïques . Le facteur d'émission issu de cette étude varie de 35 à 85 g équivalent CO₂ par kWh selon la localisation en France de l'installation et ses technologies.

Il faut remarquer que le facteur d'émission de la centrale est supérieur à la moyenne et se situe dans la fourchette haute de l'étude. Le système ne semble pas bénéficier des évolutions des technologie depuis 2011 (wafer de silicium moins énergivore, augmentation du rendement des panneaux).

Ce facteur d'émissions de 84 gCO₂/kWh pour la centrale solaire d'Albert De Mun doit être pris avec précaution : le problème de données substituées évoqué précédemment relève encore une fois cette valeur sans pouvoir la quantifier réellement.

Le rapport de l'IEA PVPS T12²² propose des valeurs types de ce facteur pour les cinq produits de référence vendus sur le marché européen, à savoir les modules à base de silicium mono-, poly- et micro-cristallin et les couches minces à base de CdTe et de CIS/CIGS. L'impact est estimé en moyenne à 59,3 g eqCO₂/kWh.



²² IEA - PVPS T12, Product Environmental Footprint Category Rules for Photovoltaic
<http://iea-pvps.org/index.php?id=56>

Masses de déchets nucléaires évités

Cible : citoyens rennais - Efficience écologique

Cet indicateur permet d'estimer les masses de déchets nucléaires qui auraient été produites si l'électricité venait du réseau, il s'agit donc de masses de déchets nucléaires dont la production a été évitée en produisant cette électricité grâce à une installation photovoltaïque. Les déchets nucléaires sont classés en deux groupes : ceux à vie longue, dont l'ambition gouvernementale est qu'ils soient enterrés ; et ceux à vie courte qui s'accumulent sur des sites de stockage.

En outre, il serait tout de même pertinent de mettre en comparaison ces données à la masse de déchets dangereux non recyclables produits pour la centrale photovoltaïque comparée sur toute sa durée de vie.

Déchets nucléaires à vie longue²³ : 791 000 kg pour 410 TWh/an = $1,929 \times 10^{-6}$ kg/kWh

Tous déchets nucléaires confondus : 57 191 000 kg pour 410 TWh/an = $139,49 \times 10^{-6}$ kg/kWh

Application :

Pour 40 000 kWh produit par an, on permet d'éviter la production de :

- $1,929 \times 10^{-6} \times 40\,000 = 77,2$ g de déchets nucléaires à vie longue évités par an
 $77,2 \times 10^{-3} \times 30 = 2,3$ kg de ces mêmes déchets sur 30 ans
- $139,49 \times 10^{-6} \times 40\,000 = 5,6$ kg de déchets nucléaires totaux évités par an
 $5,6 \times 30 = 168$ kg de de déchets nucléaires tous confondus 30 ans



Avec cet indicateur, il serait intéressant de construire une ou deux images de poids qui grossissent à mesure de la production d'électricité de la centrale. Ce ou ces poids pourraient être imagés de manière à visualiser la dangerosité des déchets concernés (symbole nucléaire, nombre de kg, radioactivité...).

²³ Wikipédia - Déchets radioactifs générés par la production d'électricité d'origine nucléaire en France, Synthèse des quantités de déchets, consulté le 02/03/2019

https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9chets_radioactifs_g%C3%A9n%C3%A9r%C3%A9s_par_la_production_d%27%C3%A9lectricit%C3%A9_d%27origine_nucl%C3%A9aire_en_France#Synth%C3%A8se_des_quantit%C3%A9s_de_d%C3%A9chets

Nombre de foyers alimentés

Cible : Citoyens et jeune public - Efficience écologique et financière

Cet indicateur a pour objectif de permettre aux citoyens de visualiser combien de foyers pourraient être alimentés par une centrale photovoltaïque. Cependant, il ne permet pas de mettre en corrélation des consommations immédiates, car il dépend de données de consommations moyennes annuelles.

Il a été difficile de trouver une valeur précise pour décrire la consommation annuelle électrique moyenne d'un foyer selon le nombre d'occupants, la superficie du logement, les habitudes de consommations, etc.

On applique à ces données des quantités de kWh économisés induites par des actions de sobriété et/ou d'efficacité énergétique, ces valeurs ont été empruntés à une étude de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME)²⁴ et seront explicitées ci-après. Elles seront accompagnées de calculs approximatifs de gain financier.

Consommation moyenne d'électricité en France pour un foyer de 2 personnes dans 70m², ayant la cuisson et l'eau chaude électrique²⁵ : - Avec chauffage électrique : 12 990 kWh / an
- Sans chauffage électrique : 3 690 kWh / an

Application :

Si une centrale produit 40 000 kWh par an, elle peut produire l'électricité équivalente à celle consommée par :

- 3,1 foyers français moyens se chauffant à l'électricité (12 990 kWh / foyer / an)
- 10,8 foyers français moyens ne se chauffant pas à l'électricité (3 690 kWh/foyer/an)
- 12 foyers français éteignant sa box 12h par jour et séchant son linge à l'air libre 6 mois par an (3 335 kWh/foyer/an)
- 14,6 foyers français moyens ayant remplacés son sèche linge, son éclairage, son réfrigérateur et son congélateur par de l'électroménager de classe A+ à A+++ (2 748 kWh/foyer/an)
- 15,5 foyers français moyens ayant réduits leur consommation et remplacés leur électroménager comme indiqué dans les 2 derniers points (2 588 kWh/foyer/an)

²⁴ ADEME - Guide pratique "Réduire sa facture d'électricité" - 2018

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-reduire-facture-electricite.pdf>

²⁵ Capitaine énergie - *Quelle est la consommation électrique d'un foyer ?* - Consulté le 03/07/2019

<https://www.capitaine-energie.com/fiches-pratiques/consommation-electrique-dun-foyer>

Calculs des scénarii d'efficacité et de sobriété, et évaluation des gains financiers :

Les valeurs qui suivent sont des ordres de grandeur pour un usage standard, elles peuvent varier en fonction de l'utilisation de l'appareil. Le coût de 17,5 ct d'euro le kWh correspond à une valeur moyenne du coût de l'électricité sur 10 ans en considérant une augmentation de 3%/an déterminée par l'ADEME²⁶.

- éteindre une **box** 12h par jour (6h en journée et 6h la nuit)
"La «box » est un équipement qui reste souvent allumé 24h sur 24 et qui génère une consommation pouvant dépasser 200 kWh / an, soit autant que le lave-linge. Sa consommation totale sur un an se situe entre 150 et 300 kWh* : c'est autant qu'un grand réfrigérateur !" * Étude « 60 millions de consommateurs » - ADEME, on utilise la fourchette basse de 150 kWh/an
= **75 kWh** économisés / an = 13 euros économisés / an
- **sécher son linge** à l'air libre 6 mois par an quand son sèche linge est de **classe B**
= **280 kWh** économisés / an = 49 euros économisés / an
- **sécher son linge** à l'air libre 6 mois par an quand son sèche linge est de **classe A+++** consommant 170 kWh / an
= 85 kWh économisés / an = 15 euros économisés / an
- **remplacer son sèche-linge B** par un sèche linge A+++ = on passe en moyenne de 560 kWh à 170 kWh consommé par an
= **390 kWh** économisés / an = 68 euros économisés / an
- **remplacer 10 lampes halogènes** de classe C par 10 lampes LED de classe A+, en équivalent 60W, on passe de 450 kWh à 70 kWh / an
= **380 kWh** économisés / an = 66 euros économisés / an
- **remplacer un réfrigérateur** 204 L 126 kWh/an A+ (Listo RLIL 203) **et un congélateur** 100L 171 kWh A+ par un réfrigérateur-congélateur A+++ 175 L 125 kWh (listo CCL 107B)
= **172 kWh** économisés par an = 30 euros économisés par an



Pour illustrer cet indicateur, il serait approprié d'utiliser des illustrations de maisons allant du rouge au vert, avec différentes teintes selon la qualité de la consommation énergétique du foyer.

²⁶ ADEME - L'autoconsommation d'électricité d'origine photovoltaïque - 2018, notes p.8
https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis-de-lademe_autoconsommation_pv_fevrier2018.pdf + Voir fichier excel de calculs Annexe 2

Conclusion

Ce projet tuteuré nous a permis de proposer six indicateurs pour les centrales de l'association Énergies du Pays de Rennes. Ce sont des indicateurs qui permettent de répondre à des interrogations du grand public autour de l'énergie grise, l'impact carbone, la quantité d'électricité produite, les déchets nucléaires et la rentabilisation financière d'une installation photovoltaïque. Un indicateur nous permet également d'inviter à la sobriété énergétique.

Pour choisir ces indicateurs, il nous a fallu mieux appréhender les impacts sur l'environnement de la centrale photovoltaïque d'Albert De Mun au travers de l'Analyse de Cycle de Vie. Cette étude nous a montré la difficulté que rencontre les bureaux d'études pour obtenir des données suffisantes et incontestables de la part des fabricants de cellules photovoltaïques, faute de réglementation contraignante. Nous avons donc pu refaire une analyse de certains résultats et aussi proposer des pistes qui visent à une meilleur efficacité énergétique des futures centrales.

Grâce à l'étude du PCAET, nous avons pu comprendre les ambitions en terme de transition énergétique de la métropole rennaise. Cette dernière souhaite produire 3% de ses besoins en électricité avec des panneaux photovoltaïques, et mise principalement sur d'autres ressources (bois, déchets, méthanisation, hydraulique, achat d'électricité renouvelable). Aussi, l'évolution des habitudes de consommation de la métropole nous laisse suspecter une augmentation des besoins en électricité. Nous avons donc fait des suggestions pour faciliter la valorisation de l'électricité solaire et plus globalement l'électricité renouvelable à Rennes.

Le travail réalisé tout au long de cette étude nous a amené à avoir une réflexion plus globale sur la gestion de l'énergie et les problématiques environnementales.

Nos indicateurs doivent maintenant interroger, susciter le débat autour des choix que nous devons faire pour demain.

Annexes

1. Cahier des charges du projet
2. Indicateurs Fronius - ABB - SolarFox
3. Fichier excel de calcul de l'évolution du prix de l'électricité
4. Calcul du productible de la centrale solaire d'Albert De Mun

Annexe 4

**Modélisation des données de production de la centrale solaire ADM à Rennes
Logiciel System Advisor Model (SAM)²⁷**

Localisation et données Météorologiques

Solar Resource Library
The Solar Resource library is a list of weather files on your computer. Choose a file from the library, or use the tools below to add files to the library.

Search for: Name

Name	Latitude	Longitude	Time zone	Elevation	Station ID
tmy_era_48.096_-0.8_2007_2016	48.096	-0.8	1	95	unknown
tmy_era_48.101_-1.666_2007_2016	48.101	-1.666	1	39	unknown
ADM RENNES 48.102 1.666 2007 2016	48.102	-1.666	1	40	unknown

SAM scans the following folders on your computer for valid weather files and adds them to your Solar Resource library. To use weather files stored on your computer, add folders containing the files.

C:\Users\Utilisateur\SAM Downloaded Weather Files
C:\Users\Utilisateur\Documents\LP ACTEER\judicaël aubry

Download Weather Files
Download the latest weather files from the NSRDB to add to your solar resource library: Download a typical-year (TMY) file for most long-term cash flow analyses, or choose files to download for single-year or P50/P90 analyses. See Help for details.

One location Multiple locations Legacy data (advanced)

Type a location name, street address, or latitude and longitude Default TMY file

[Go to SAM website Weather Page for information about NSRDB and PVGIS, and for links to other sources of solar resource data](#)

Weather Data Information
The following information describes the data in the highlighted weather file from the Solar Resource library above. This is the file SAM will use when you click Simulate.

Weather file: C:\Users\Utilisateur\SAM Downloaded Weather Files\tmy_era_48.101_-1.666_2007_2016.epw

-Header Data from Weather File-

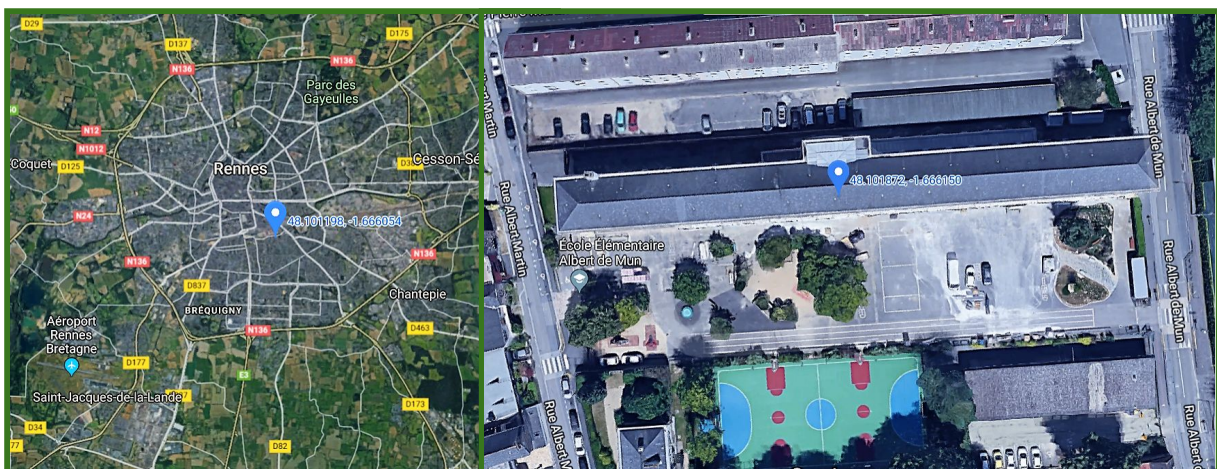
Station ID	unknown	Latitude	48.101 °N °N	For NSRDB data, the latitude and longitude shown here from the weather file header are the coordinates of the NSRDB grid cell and may be different from the values in the file name, which are the coordinates of the requested location.
Data Source	ECMWF/ERA	Longitude	-1.666 °E °E	
Elevation	39 m	Time zone	GMT 1	

-Annual Averages Calculated from Weather File Data-

Global horizontal	3.31 kWh/m ² /day	Average temperature	11.6 °C	-Optional Data-	
Direct normal (beam)	3.12 kWh/m ² /day	Average wind speed	3.8 m/s	Maximum snow depth	NaN cm
Diffuse horizontal	1.66 kWh/m ² /day			Annual albedo	-999

*NaN indicates missing data.

Localisation centrale solaire d'Albert De Mun - Rennes



²⁷ NREL - System Advisor System (SAM) <https://sam.nrel.gov/>

Caractéristique du module Systovy V-SYS 250 WC

CEC Performance Model with User Entered Specifications

General Information

Module description: SYSTOVI V-SYS 250 WC Generic monocristin silik
 Cell type: monoSi
 Module area: 1.506 m²
 Nominal operating cell temperature: 47 °C

Bifacial Specifications

Module is bifacial

Transmission fraction: 0.013 0-1 Ground clearance height: 1 m
 Bifaciality: 0.65 0-1

Nominal Maximum Power Point Ratings at STC

Power: 245.164 Wdc
 Efficiency: 16.2791 %

Electrical Specifications

Maximum power point voltage (Vmp): 28.836 V
 Maximum power point current (Imp): 8.502 A
 Open circuit voltage (Voc): 34.398 V
 Short circuit current (Isc): 8.811 A
 Temperature coefficient of Voc: -0.346 %/°C
 Temperature coefficient of Isc: 0.036 %/°C
 Temperature coefficient of max. power point: -0.47 %/°C
 Number of cells in series: 54

The model assumes a reference bandgap voltage Eg_ref = 1.121 eV, and temperature coefficient for bandgap of -0.0002677 eV/K.

Mounting Configuration

Standoff height: Ground or rack mounted
 Approximate installation height: One story building height or lower

References

For information about the CEC module model inputs, see Help. For details about the model implementation, see Gilman (2015) on the SAM website's Performance Model Documentation page:
[Performance Model Documentation page on SAM website](#)

Current-Voltage (I-V) Curve at STC

Calculate and plot

Caractéristique technique micro onduleur EMPHASE ENERGY M215

Name	Paco	Pdco	Pso	Pnt	Vac	Vdcmx
Enphase Energy Inc : M215-60-2LL-S2x-IG-ZC [208V] 208V [CEC...	215	225.205551	0.735509	0.05	208	36
Enphase Energy Inc : M215-60-2LL-S2x-IG-ZC [240V] 240V [CEC...	215	224.273514	0.71131	0.05	240	36
Enphase Energy Inc : M215-60-2LL-S2x-IG-ZC-NA [208V] 208V [...]	215	225.205551	0.735509	0.05	208	36
Enphase Energy Inc : M215-60-2LL-S2x-IG-ZC-NA [240V] 240V [...]	215	224.273514	0.71131	0.05	240	36
Enphase Energy Inc : M215-60-2LL-S2x-NA [208V] 208V [CEC 2...	215	225.387497	0.771154	0.04	208	36

Efficiency Curve and Characteristics

Enphase Energy Inc : M215-60-2LL-S2x-IG-ZC-NA [240V] 240V [CEC 2018]

Number of MPPT inputs: 1 CEC weighted efficiency: 96.029 %
 European weighted efficiency: 95.819 %

Datasheet Parameters

Maximum AC power: 215 Wac
 Maximum DC power: 224.274 Wdc
 Power consumption during operation: 0.71131 Wdc
 Power consumption at night: 0.05 Wac
 Nominal AC voltage: 240 Vac
 Maximum DC voltage: 36 Vdc
 Maximum DC current: 7.73357 Adc
 Minimum MPPT DC voltage: 22 Vdc
 Nominal DC voltage: 29 Vdc
 Maximum MPPT DC voltage: 36 Vdc

Sandia Coefficients

C0: -6.1e-05 1/Wac
 C1: -0.000689 1/Vdc
 C2: -0.023426 1/Vdc
 C3: -0.093711 1/Vdc

Configuration électrique du système - inclinaison et orientation

AC Sizing	Sizing Summary
Number of inverters <input type="text" value="144"/> DC to AC ratio <input type="text" value="1.14"/> Size the system using modules per string and strings in parallel inputs below. <input type="checkbox"/> Estimate Subarray 1 configuration	Total AC capacity <input type="text" value="30.960"/> kWac Total inverter DC capacity <input type="text" value="32.295"/> kWdc Nameplate DC capacity <input type="text" value="35.304"/> kWdc Total number of modules <input type="text" value="144"/> Total number of strings <input type="text" value="144"/> Total module area <input type="text" value="216.9"/> m ²

-DC Sizing and Configuration-

To model a system with one array, specify properties for Subarray 1 and disable Subarrays 2, 3, and 4. To model a system with up to four subarrays connected in parallel to a single bank of inverters, for each subarray, check Enable and specify a number of strings and other properties.

	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
-Electrical Configuration-	(always enabled)	<input type="checkbox"/> Enable	<input type="checkbox"/> Enable	<input type="checkbox"/> Enable
Modules per string in subarray	<input type="text" value="1"/>			
Strings in parallel in subarray	<input type="text" value="144"/>			
Number of modules in subarray	<input type="text" value="144"/>			
String Voc at reference conditions (V)	<input type="text" value="34.4"/>			
String Vmp at reference conditions (V)	<input type="text" value="28.8"/>			

-Tracking & Orientation-

Azimuth
N = 0
W 270
E 90
S 180

Tilt
90° Vert.
0° Horiz.

Fixed
 1 Axis
 2 Axis
 Azimuth Axis
 Seasonal Tilt

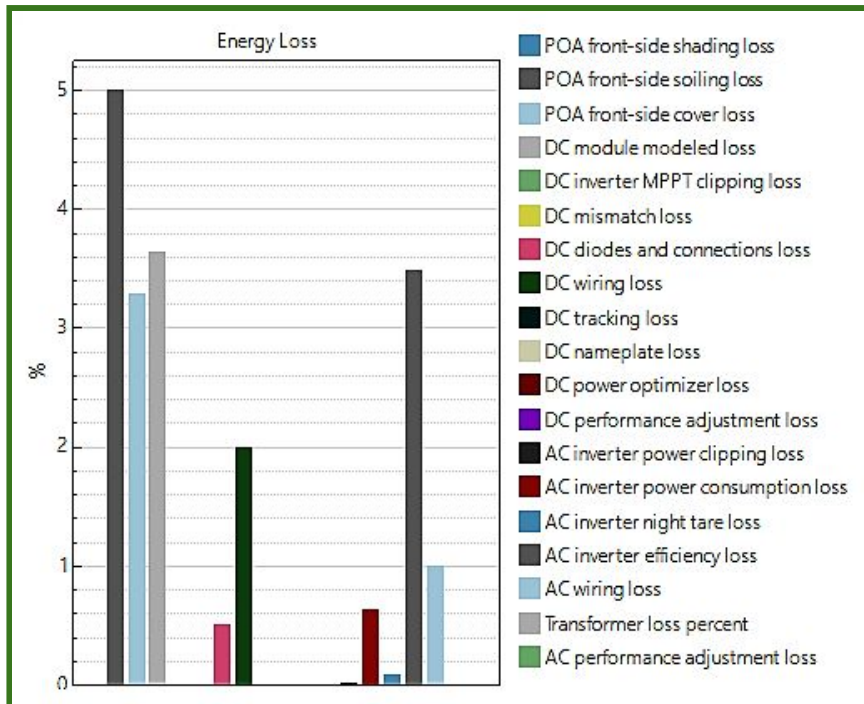
Tilt=latitude

Tilt (deg)
 Azimuth (deg)
 Ground coverage ratio (GCR)
 Tracker rotation limit (deg)

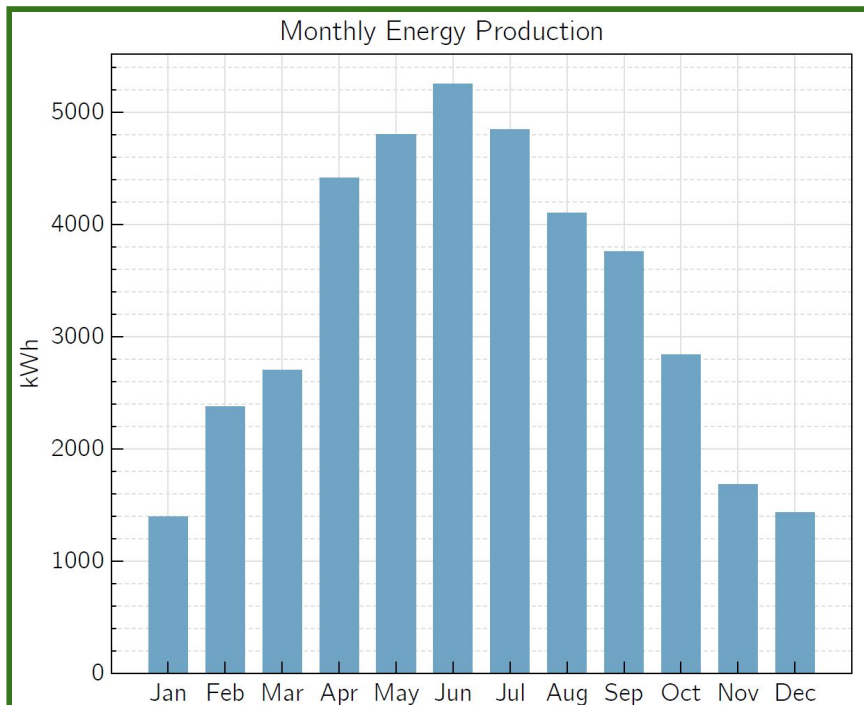
Backtracking Enable

Ground coverage ratio is used (1) to determine when a one-axis tracking system will backtrack, (2) in self-shading calculations for fixed tilt or one-axis tracking systems on the Shading page, and (3) in the total land area calculation. See Help for details.

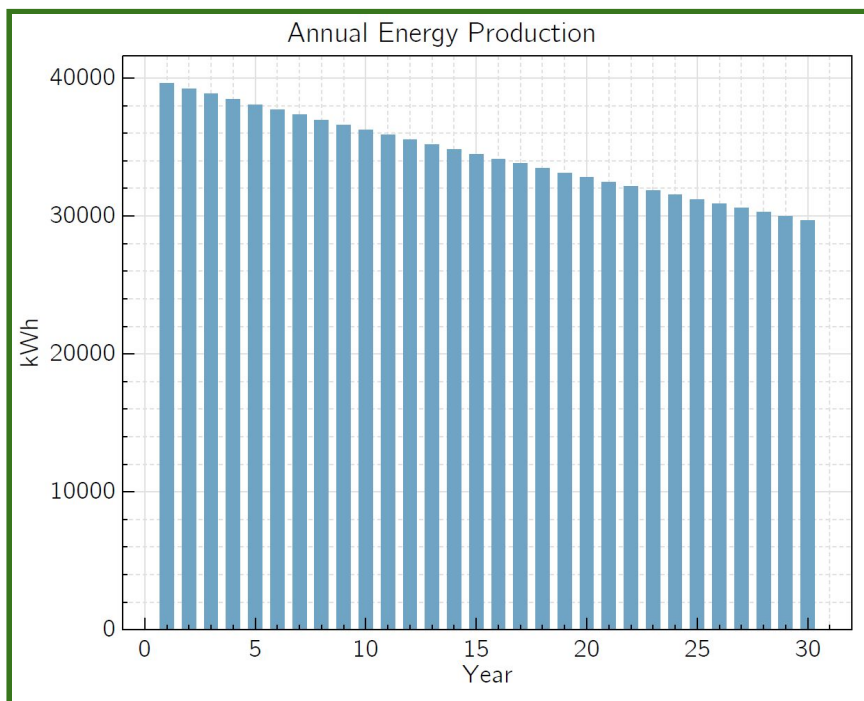
Répartition des pertes du Système




Production mensuelle (kWh) de la centrale solaire ADM



Variation de la production du système sur 30 ans



Caractéristiques techniques Panneaux Solaires Systovi V-SYS 250 WC

PMAX (WC)	250 WC	275 WC
DONNÉES MÉCANIQUES		
Dimensions (H x L x P)	1510 x 998 x 40 mm	1661 x 998 x 40 mm
Poids du capteur	20,7 kg (16 kg/m ²)	23 kg (16 kg/m ²)
Cellules solaires	Cellules monocristallines Si 6,2'' (156 x 156 mm)	
Nombre de cellules	54	60
Origine des panneaux (encapsulation)	France (Saint-Herblain - 44)	
Verre	3,2 mm anti-reflet	
Face arrière	Film composite noir	
Cadre	Aluminium anodisé noir	
DONNÉES INTÉGRATION		
Orientation	Portrait / Paysage	
Couverture	Tous types	
Inclinaison toiture	15° à 60° (jusqu'à 6° si couverture complète, sous conditions)	
Rampant mini. nécessaire (abergements compris)	3,4 m	3,7 m
Norme d'intégration	IAB toutes couvertures, y compris ardoise (< 2 cm)	
CONDITIONS DE SERVICE ADMISSIBLES		
Tolérance de puissance	-2/+2 %	
Rendement	16,6 %	
Tension max système Vmax (U)	1000 V	
Courant max système Imax (A)	17 A	
Vmpp (V)	28,836	32,04
Impp (A)	8,502	
Voc (V)	34,398	38,22
Isc (A)	8,811	
Protection Courant inverse Irm (A)	15	
Température normale de fonctionnement (NOCT)	47 °C	
Température de fonctionnement (OC)	de -40 °C à 85 °C	
Coefficient de température (Voc)	-0,346 %/K	
Coefficient de température (Isc)	0,036 %/K	
Coefficient de température (Pmax)	-0,470 %/K	
Charge maximale	Test avancé jusqu'à 5400 Pa selon IEC 61215	
Résistance à la grêle	Jusqu'à un diamètre de 25 mm avec une vitesse d'impact de 23 m/s	
CERTIFICATIONS		
	Certificat IEC 61215 ed.2 Certificat 61730	