



Sommaire

Recyclage des panneaux photovoltaïques P 1

Systèmes houlomoteurs bords à quai P3

Nos prochaines conférences

Mercredi 19 octobre

**SERONS-NOUS PRETS
POUR 100% DE
VEHICULES ELECTRIQUES
EN 2035 ?**

Mercredi 16 novembre

LE SOLAIRE FLOTTANT

Inscriptions sur notre site internet
www.centrale-energies.fr

Comité de relecture

Christiane DREVET

Guy MOREAU

Claude POIRSON

RECYCLAGE des PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Alain Argenson (ECN 1962)

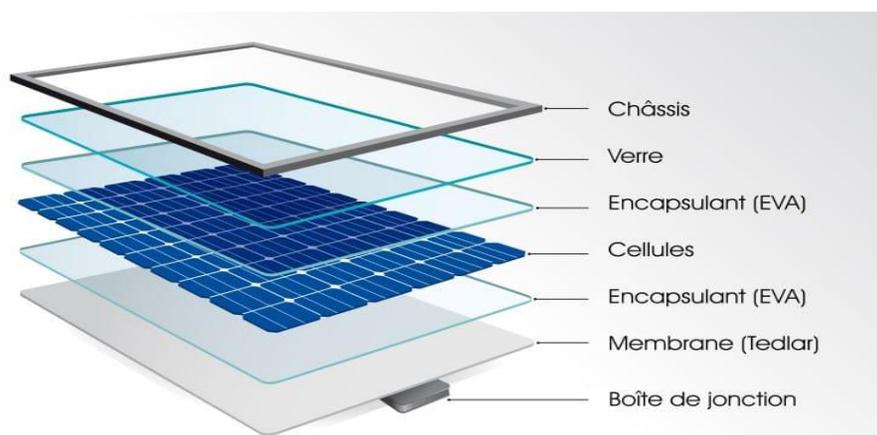
En 2050 il est probable que le photovoltaïque aura une place importante dans la production d'électricité. L'augmentation du rendement des cellules photovoltaïques est importante ainsi que l'est le recyclage des matériaux.

L'augmentation du rendement constitue le meilleur moyen de réduire les coûts de l'électricité solaire. En outre, elle favorise l'adoption du photovoltaïque lorsque les surfaces disponibles sont limitées. C'est notamment le cas des toitures, des façades et des véhicules.

La pénurie des matériaux qui s'annonce nous fait obligation à la fois de recycler les matériaux et par l'analyse du cycle de vie (ACV) de concevoir des systèmes économes en matériaux et facilement recyclables.

Les modules photovoltaïques sont constitués de cellules dont la majorité sont à base de silicium (monocristallin, polycristallin, amorphe)

Composition des modules photovoltaïques cristallins :



Châssis : le plus souvent en aluminium (10 à 15% du poids total)

Verre avec antimoine pour améliorer la transparence : (70 à 75% du poids total)

Encapsulant (EVA) : fine couche de polymère assurant la parfaite étanchéité à l'air et à l'eau

Cellules : silicium (3 à 5% du poids total) et éléments dopants comme le bore et le phosphore + fil d'argent

Membrane : fine couche (1 à 2 mm) de polymère

RENDEMENT DES CELLULES

Le rendement maximum théorique de conversion des cellules à base de silicium est de 29%. Les cellules commercialisées sont dites à homojonction (un seul matériau, le silicium). Le rendement actuel est de 19 % pour du polycristallin, et 22% pour du monocristallin.

La cellule photovoltaïque à hétérojonction est constituée de deux semi-conducteurs différents : le silicium cristallin et le silicium amorphe, ce qui permet d'augmenter le rendement. Pour un module commercialisé le rendement commence à atteindre plus de 24 % en production et approcher 25 % en présérie.

Le rendement peut aussi être augmenté en déposant des couches de pérovskite (cristal composé de différents matériaux) de haute qualité sur des cellules en silicium. Il a été ainsi obtenu **un rendement de conversion de 30,93%** pour une cellule de 1 cm². Ensuite, en utilisant un procédé hybride de déposition de la pérovskite sur des surfaces du silicium laissées intentionnellement rugueuses (pour réduire au minimum la réflexion de la lumière), il a été réalisé une cellule (de 1 cm² également) qui atteint **une efficacité de 31,25 %**. Ces résultats constituent **deux nouveaux records du monde** : l'un pour l'architecture lisse et l'autre pour la rugueuse.

A l'Institut Fraunhofer pour l'énergie solaire (**Fraunhofer ISE**) un rendement de 47,6% a été obtenu pour une cellule photovoltaïque tandem à quatre jonctions. Toutefois, il s'agit là d'une technologie onéreuse qui peut être utile dans des applications particulières mais qui ne pourra vraisemblablement pas être développée en masse.

Ces nouvelles technologies ne doivent pas oublier le problème du recyclage.

RECYCLAGE

En France fin 2021 il y avait au total 1,245 000 Tonnes de panneaux installés dont 185 000 Tonnes en 2021. Depuis fin 2015, il y a eu 20 000 Tonnes de panneaux collectés, et 5 500 Tonnes de panneaux valorisés en 2021.

Aucun pays dans le monde ne valorise les matériaux constituant les cellules photo électriques.

La pénurie des matériaux qui s'annonce nous fait obligation à la fois de recycler les matériaux et par l'analyse du cycle de vie (ACV) de concevoir des systèmes économes en matériaux et facilement recyclables.

La France a fait le choix pour respecter la directive européenne sur les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) d'étendre la responsabilité élargie du producteur (REP) aux panneaux photovoltaïques. Elle a donc créé un éco-organisme (SOREN) à but non lucratif chargé de la collecte des panneaux usagés et de leur traitement.

Pour recycler un panneau photovoltaïque il faut commencer par démonter le châssis et la boîte de jonction, et ôter la membrane arrière en polymère. L'aluminium et les quelques % de cuivre issus des câbles et des soudures sont fondus et réutilisés. Les composants plastiques sont valorisés énergétiquement en combustibles solides de récupération.

La couche contenant le verre et les cellules est finement broyée et utilisée comme sable technique selon la granulométrie. Cette pratique n'est évidemment pas satisfaisante puisque les cellules et en particulier l'argent et le **cuivre** qu'elles contiennent ne sont pas récupérés. La production de silicium de qualité photovoltaïque est très énergivore. Son réemploi permettrait une importante économie d'énergie et de CO².

Le verre, à cause de la présence d'antimoine, est difficilement réutilisable. Il est possible de broyer et de fondre le verre pour être à nouveau utilisé. Cette solution n'est pas encore viable sur le plan économique et environnemental. Les plaques de verre intactes pourraient être réemployées mais les tailles différentes des panneaux ne facilitent pas la mise en œuvre.

La profusion et le faible coût du silicium photovoltaïque n'incitent pas à investir dans son recyclage.

La start-up française Rosi-Solar ainsi qu'un consortium mené par l'institut Fraunhofer (Allemagne) recherchent des solutions pour recycler les cellules.

La première étape est la séparation des cellules de la plaque de verre (délaminage) contre laquelle elles sont pressées à chaud. Ensuite Rosi Solar a développé une approche thermique pour

dégrader les polymères et libérer le cuivre qui se détache. Un traitement liquide permet ensuite de récupérer les fils d'argent. Le silicium est alors revendu à des usines de purification qui les incorporent dans leur fabrication. Ce silicium récupéré a déjà une pureté proche de celui nécessaire à la fabrication de nouvelles cellules. En conséquence l'énergie nécessaire à la fabrication de nouvelles cellules s'en trouve diminuée.

Pour Rosi Solar les revenus proviennent de l'éco participation collectée par SOREN pour chaque module vendu et de la revente des métaux dont l'argent pour 50%.

Un recyclage efficace commence dès la conception des panneaux et principalement des cellules.

SYSTEMES HOULOMOTEURS BORDS A QUAI

Alain ARGENSON (ECN 1962)

Le Ministère de la transition écologique et solidaire a initié en 2011 dans le cadre du réseau Génie Civil et Urbain (RGCU) un projet national intitulé EMACOP (Energies Marines Côtières et Portuaires) consistant à analyser les systèmes de récupération des énergies issues de la mer en interaction forte avec les infrastructures côtières et portuaires.

Puissance des vagues

L'énergie de la houle est une énergie saisonnière. Elle est 5 à 10 fois plus forte en hiver qu'en été. Les puissances moyennes sur l'année sont calculées pour des profondeurs supérieures à 20m et atteignent facilement 50kW/m au large. Elles sont estimées entre 5 et 20kW/m au pied des ouvrages dans les zones propices

Après analyse des différents systèmes il est apparu que l'énergie houlomotrice était la plus présente et la plus accessible au droit des infrastructures du littoral français.

Le projet EMACOP s'est concentré sur l'analyse des systèmes bords à quai.

Les systèmes pour récupérer l'énergie des vagues se classent en 4 familles : colonne d'eau oscillante, franchissement, batteur oscillant, flotteur.

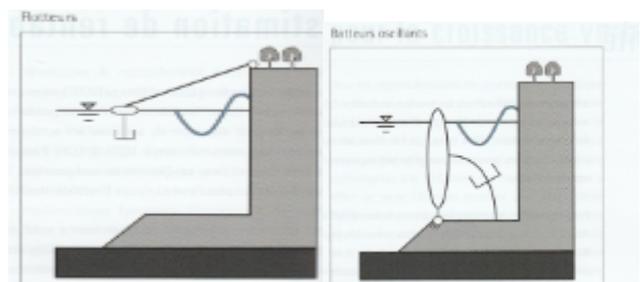
L'énergie des vagues est globalement plus faible « bord à quai » car les profondeurs sont plus faibles toutefois 3 points positifs :

- Le phénomène de réfraction de la houle sur le fond augmente l'énergie.
- Ce même phénomène diminue l'étalement directionnel de qui améliore le rendement
- La réflexion de la houle sur la digue peut augmenter le rendement

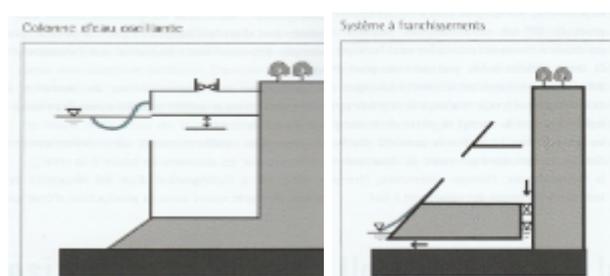
Les 4 familles des systèmes houlomoteurs bord à quai :

Flotteur

Batteur oscillant



Colonne d'eau oscillante Système à franchissement



Sites propices

L'étude a débuté par la reconnaissance des sites propices à l'installation de ces systèmes. Une cartographie de l'énergie houlomotrice et de sa puissance a été établie. Vingt-deux sites en Manche et en océan Atlantique ont été sélectionnés. L'évaluation de la puissance disponible au droit des digues a conduit à en

éliminer 8 dont la puissance de houle annuelle est inférieure à 2,5kW/m.

Une deuxième phase d'évaluation a permis de sélectionner 9 sites d'études dont la puissance de houle annuelle varie de 4,4kW/m à Cherbourg jusqu'à 24,3kW/m à Bayonne. Il ne reste plus que 9 sites à fort potentiel : Antifer, Cherbourg, Flamanville, Le Conquet, Esquibien, Saint-Guénolé, Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Bayonne et Saint-Jean-de-Luz.

Pour estimer plus précisément le potentiel houlomoteur sur ces sites il a été décidé d'avoir recours à des modèles numériques. Des mesures in-situ faites à Saint-Guénolé comparées aux résultats des modèles numériques ont montré des écarts importants et donc la nécessité de faire des mesures sur une longue période.

Choix du meilleur système

Le choix du meilleur système a été effectué sur le site de Saint-Jean-de Luz en regard de son potentiel houlomoteur important.

Les quatre systèmes houlomoteurs étudiés sont :

- Système à franchissement de type SSG (Slot Cone generator)
- Colonne oscillante
- Volet oscillant
- Flotteur ou bouée pilonnant

Les estimations qui suivent sont fournies à titre indicatif et fournissent des ordres de grandeur.

Coût de l'énergie :

Systèmes houlomoteurs	LCOE en Euro/kWh r=10%
Franchissement	1,37-1,25
Colonnes oscillantes	2,17-1,73
Volet oscillant	0,47-0,40
Bouée pilonnante	0,37-0,27

Rendement global (puissance convertie en électricité/puissance incidente) :

Systèmes houlomoteurs	Puissance absorbée (kW/m)	Puissance moyenne produite (kW/m)	Rendement global (%)
Franchissement	2-3,3	1,2	8,5
Colonnes oscillantes	2,8	0,8	6-6,5
Volet oscillant	13,3	2,5-3,5	17-25
Bouée pilonnante	6	1,5-2,1	11-15

Avec des LCOE supérieurs à 1€/kWh les systèmes à franchissement et à colonnes oscillantes sont peu compétitifs (solaire et éolien sont à 0,06-0,010 €/kWh),. Toutefois il faut considérer des bénéfices secondaires vis à vis des submersions, de l'érosion ou d'implantation particulière.

Les systèmes à franchissement et les colonnes oscillantes demandent beaucoup de génie civil et seraient plutôt à installer lors de la construction comme élément de la digue.

Exemple de flotteur pilonnant-jetée de Gibraltar (ECO WAVE PpOWER 2016)

