

# La STEP marine de petit canal en Guadeloupe : une solution de stockage pour l'insertion des ENR intermittentes

Pierre BRUN<sup>1</sup>, Bernard MAHIOU<sup>2</sup>, Michel AYOUB<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EDF – Direction des Systèmes Energétiques Insulaires – pierre.brun@edf.fr

<sup>2</sup> EDF – Direction des Systèmes Energétiques Insulaires – bernard.mahiou@edf.fr

<sup>3</sup> EDF - Centre d'Ingénierie Hydraulique – michel.ayoub@edf.fr

**RÉSUMÉ.** – Le projet SEPMEI (Stockage d'Énergie par Pompage en Mer permettant le développement des Énergies Renouvelables Intermittentes), consiste à réaliser en Guadeloupe une STEP marine de 50 MW pouvant fonctionner 12 h à pleine puissance. L'ouvrage permettra de stocker de l'électricité et de faciliter l'insertion des ENR intermittentes (éolien et photovoltaïque) dans le système électrique de cette île.

Le bassin (de l'ordre de 4,7 hm<sup>3</sup>) sera créé en sommet de falaise et totalement étanché. La hauteur de chute moyenne est de 67 m. Les études de faisabilité technico-économiques et la volonté d'amorcer une filière industrielle prometteuse ont conduit à retenir une usine préfabriquée en caisson acier comprenant un équipement constitué de petites pompes fonctionnant également en turbine.

En 2050, le besoin de stockage par STEP marine pourrait atteindre quelques milliers de MW en France et dans les pays européens et plusieurs dizaines de milliers de MW dans le reste du monde. Le potentiel de sites qui peuvent être équipés par des STEP marines, même en tenant compte des contraintes, est très important et voisin de quelques milliers d'emplacements. La solution usine en caisson préfabriquée peut répondre à la majorité des cas de figure du marché (petites ou moyenne chute) avec un équipement pompes réversibles ou turbines/pompes.

Il a été mis en évidence que la courbe d'apprentissage pourrait conduire à des coûts de construction inférieurs à 1500 €/kW (hors raccordement) compétitifs avec ceux de STEP terrestres dans le cas de suréquipements.

Mots-clés : Stockage hydraulique, STEP marine, système électrique insulaire, ENR intermittentes

## The Petit Canal Sea water pumped storage plant in Guadeloupe island: a tool to allow the intermittent renewable energy development

**ABSTRACT.** – In the frame of the 2011 call for proposal 'Energy storage' launched by the ADEME (French Environment and Energy Management Agency, EDF aims to propose a 50 MW seawater pumped storage project for the island of Guadeloupe. The project, named SEPMEI (in French Stockage d'Énergie par Pompage en Mer permettant le développement des Énergies Renouvelables Intermittentes), or SPSIRE (in English Seawater Pumped Storage allowing the development of Intermittent Renewable Energy).

This project needs to build an upper reservoir with a capacity of 4.7 Mm<sup>3</sup> storing 0.6 GWh (12 hour time duration service at full load) with embankments and an overall watertightness. The average waterhead is 67 m.

This innovating scheme, equipped with pumps as turbines hosted in an iron precast powerhouse at the foot of the cliff will be able to store energy and to smooth the intermittent renewable energy generation. Such project will improve the hosting capacity for the intermittent generation upper the legal limit of 30% applied to preserve the safety of power systems in French insular systems.

In 2050, the need of storage with seawater pumped power plants could reach some thousand of MW in France and in boundary European countries and ten times more in the rest of the world. The number of sites which could be developed for seawater pumped storage powerplants is very important (about several thousand), even taking into account all the constraints. The technological option using an iron precast powerhouse can be deployed in the majority of market cases (low and medium waterhead) with equipment either pump as turbines, either reversible turbines/pumps.

It has been shown that the learning curve could lead to construction costs lower than 1500 €/kW (excluding grid connection) competitive with those of on shore pumped storage projects based on upgrading existing hydro power plants.

Key-words: Hydraulic storage, Sea water pumped storage power plant, Insular electric grid, Intermittent renewable energy

## I. INTRODUCTION

Le projet dénommé SEPMEI (Stockage d'Énergie par Pompage en Mer permettant le développement des Énergies Renouvelables Intermittentes) a été proposé dans le cadre de l'Appel à Manifestation d'Intérêt (AMI) Stockage d'avril

2011 de l'ADEME. Il consiste à réaliser en Guadeloupe sur le site de Petit Canal une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) innovante alimentée en eau de mer. L'ouvrage permettra de stocker de l'électricité à la demande et de faciliter l'insertion des ENR intermittentes dans le système électrique de cette île.

L'article présente tout d'abord le contexte du projet, le retour d'expérience (REX) qui a pu être établi sur la STEP marine d'Okinawa et les objectifs de STEP marines dans les Zones Non Interconnectées (ZNI). Le projet de Petit Canal en Guadeloupe est ensuite présenté en détail. Enfin le développement de la filière des STEP marines est abordé sur les bases d'une étude de marché préliminaire et des extrapolations des résultats des études techniques du site Guadeloupéen.

## II. CONTEXTE ET HISTORIQUE DU PROJET DE STEP MARINE

Le développement des énergies renouvelables intermittentes pour la production d'énergie devrait engendrer des besoins importants en matière de stockage de l'énergie.

Du fait du développement de la pénétration des EnR intermittentes, le marché mondial du stockage est en fort développement et en particulier celui du stockage de masse dont le stockage hydraulique de type STEP représente la part majoritaire (129 sur 130 GW à ce jour).

Le développement des STEPs terrestres en Europe sera contraint dans les années à venir par le fait que les meilleurs sites ont déjà été équipés et par le contexte environnemental de plus en plus contraignant pour ce type d'installation. Par ailleurs les circuits hydrauliques des STEPs terrestres sont relativement longs et ne permettent pas d'atteindre des temps de réponses courts (inférieurs à la minute). Les STEPs marines peuvent s'affranchir de ce problème et permettent de minimiser le coût et les impacts environnementaux tout en offrant des implantations à proximité des fermes d'Energie Marine Renouvelable et en particulier des champs d'éoliennes off shore. A ce titre les STEP marines peuvent permettre de contribuer au développement des Energies Marines Renouvelables. Les zones insulaires de part la spécificité de leurs systèmes électriques de petite taille et caractérisés par des taux de pénétration des EnR intermittentes élevés offrent des laboratoires pour l'installation de démonstrateurs de STEPs marine.

Le besoin le plus marqué dans les ZNI pour un projet de STEP marine est en Guadeloupe où un site a été retenu sur la commune de Petit Canal.

A noter qu'au-delà du projet réalisé de STEP marine d'Okinawa (cf. III), un certain nombre de projets de ce type ont été ou sont étudiés dans le monde au Japon, en Irlande, à Hawaï, en Californie, en Indonésie, au Cap Vert, aux Açores,



Figure 1 : Vue du site de STEP marine de Petit Canal.

au Royaume Uni et au Maroc. Pour l'instant aucun de ces nouveaux projet n'est en cours de construction et le financement ainsi que la rentabilité économique sont des freins à leur développement.

## III. REX DE LA STEP MARINE D'OKINAWA [IEA, Fujihara 1998, Hiratsuka 1993]

La seule STEP marine au monde, construite par les Japonais sur l'île d'Okinawa, a été conçue dans les années 90 pour un fonctionnement en pointe. Elle n'a pas de vocation initiale à lisser l'intermittence.

L'installation est équipée d'une seule pompe-turbine de 30 MW à vitesse variable fonctionnant sous 152 m de chute maximale. Elle est équipée d'un alternateur-moteur asynchrone à rotor bobiné. Les temps de démarrage sont nettement plus élevés (quelques minutes) que ceux demandés pour le projet Guadeloupéen (quelques secondes). Le réservoir de 0,56 hm<sup>3</sup> (5 heures de stockage à pleine puissance) est entièrement étanché par une membrane caoutchouc donnant pleine satisfaction à l'exploitant. D'autres matériaux anticorrosion et anti-fouling ont été utilisés pour réaliser le revêtement du puits haute-pression (PRV) ou les revêtements de prise d'eau.

Les contraintes environnementales ont été traitées avec soin méticuleux dans un environnement naturel sensible à Okinawa.

Le coût de construction de cette centrale pilote a été élevé (37.000 M¥ (Yens 1999) soit environ 285 M€) du fait de son caractère expérimental et des tranches d'investissement budgétaires réparties sur 8 années.

Le REX technique depuis la mise en service est excellent.

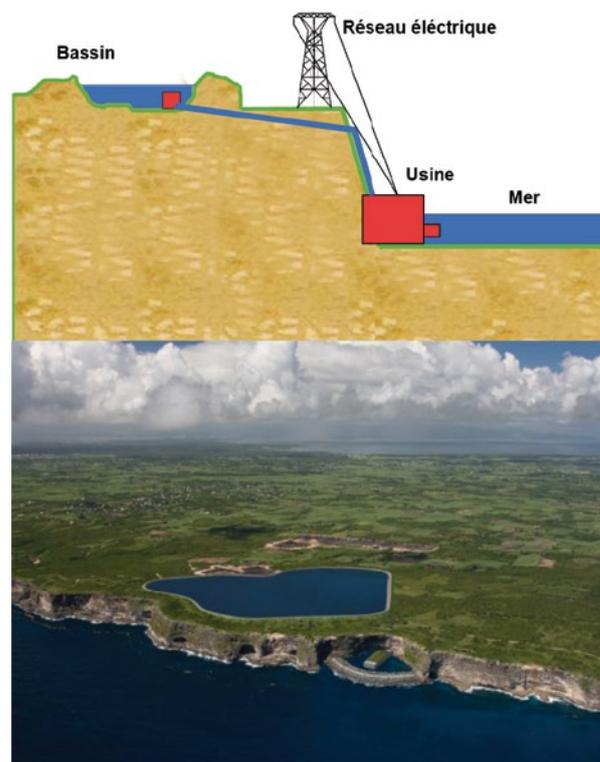


Figure 2 : Principe et photomontage vue d'ensemble de l'aménagement.

#### IV. OBJECTIFS DU PROJET DE STEP MARINE DANS LES ZNI

Dans les ZNI, une STEP marine pourrait permettre d'utiliser et de gérer au mieux les EnR intermittentes (éolien et photovoltaïque) non modulables et donc favoriser leur développement et leur intégration dans le mix énergétique de demain en s'affranchissant de la contrainte de taux de pénétration limitée des EnR fatales (limité à 30% par l'arrêté du 23 avril 2008 établi après des études d'EDF R&D et un retour d'expérience important d'autres systèmes insulaires).

Les objectifs d'un tel projet sont les suivants :

- lissage des pointes par un transfert d'énergie journalier permettant un gain économique en évitant le recours aux Turbines à Combustion (TACs) qui fournissent l'énergie de pointe,
- diminution des arrêts démarrages des groupes thermiques,
- utilisation en substitution lors de rupture de production d'énergies fatales (période sans vent par exemple) par un report d'énergie sur plusieurs jours, ce qui est possible compte tenu du facteur de charge de l'éolien même avec un temps de fonctionnement de la STEP de 12h,
- report de la production photovoltaïque vers la pointe du soir,
- lissage de production intermittente (photovoltaïque et éolien).

Il permettra d'éviter le renouvellement de TACs fortement émettrices de CO<sub>2</sub>.

#### V. PROJET DE STEP MARINE EN GUADELOUPE

##### V.1. Montage et développement du projet

La localisation du site de Petit Canal comporte deux avantages principaux :

- des contraintes limitées vis-à-vis des protections réglementaires (espaces remarquables littoraux),
- la maîtrise d'une grande partie du foncier du fait de la présence du parc éolien d'EDF EN.

Le projet est développé par EDF en partenariat avec ALSTOM HYDRO, ALSTOM BERGERON, STX, EUROVIA, ETANDEX, INGEROP, de l'Institut Polytechnique de Grenoble et de l'Université Antilles Guyane.

Le projet est soutenu par les collectivités territoriales au premier rang desquelles, les Régions concernées Région Guadeloupe et Région Pays de la Loire où sera fabriqué le caisson usine (cf. V.4) dans les chantiers STX.

Le principe d'une société de projet (comprenant EDF majoritaire ainsi que des investisseurs publics et privés) a été retenu.

Le projet n'utilisant pas la force des cours d'eau est un outil industriel qui n'est pas soumis à la loi de 1919 et au régime des concessions hydrauliques. Les autorisations nécessaires pour ce projet sont donc les suivantes :

- autorisation au titre de la Loi sur l'Eau,
- autorisation d'occupation du Domaine Public Maritime, (concession DPM),
- autorisation au titre du code de l'énergie,
- permis de construire,
- autorisation liées au raccordement au réseau électrique.

Le projet sera également soumis à enquête publique et nécessitera une Etude d'impact.

A noter que le site n'étant pas situé dans un espace remarquable du littoral les seuls points délicats concernent la compatibilité avec le Schéma d'Aménagement Régional (SAR)

et les dispositions de la loi littoral et notamment de la règle de l'extension de l'urbanisation en continuité des agglomérations et villages existants.

Pour ce qui est de la compatibilité avec le SAR des procédures permettent d'obtenir la modification de ce document. Pour le respect de la loi littoral, le Conseil Régional a le pouvoir d'adopter sous conditions des dispositions adaptant la loi littoral en vertu de son habilitation législative prévue par l'article 73 de la constitution.

En revanche dans des zones où le Conseil Régional n'a pas une telle habilitation, un projet de STEP marine ne pourra être développé que si une évolution législative intervient.

##### V.2. Dimensionnement du projet

Le dimensionnement optimal du projet a été réalisé en tenant compte :

- des bilans prévisionnels du mix énergétique guadeloupéen,
- des caractéristiques du réseau,
- de la nécessité de pouvoir mobiliser 15 MW de réserve rapide (réglage primaire de fréquence en moins de 10 secondes)
- et de la nécessité de pouvoir moduler la puissance sur toute sa plage de fonctionnement de façon continue avec une dynamique lente de l'ordre de  $\pm 20$  MW/minute adaptée au lissage des énergies intermittentes.

Les fondamentaux du projet sont synthétisés comme suit :

- Puissance installée de 50 MW, Temps de fonctionnement de 12 h (0,6 GWh de stockage),
- Temps de réponse inférieur à 10 s,
- Type de fonctionnement de la STEP : journalier mais avec report hebdomadaire possible.

##### V.3. Reconnaissances de site [Duval]

Les reconnaissances de terrain réalisées ont été classiques pour ce type d'étude. Elles ont été complétées par des dispositions particulières visant à qualifier la faille géologique active proche du site :

- reconnaissances géologiques (levés de terrain),
- reconnaissances topographiques (levé topographique réalisé LIDAR hélicoptère, la bathymétrie du SHOM a été assemblée avec les cartes terrestres),
- reconnaissances géophysiques (radar terrestre, panneaux électriques, sismiques réfraction et réflexion) ont permis d'investiguer le sous-sol en profondeur et notamment de préciser la position de la faille active et des ses ramifications,
- reconnaissances géotechniques par forages (5 forages carottés de 60 à 70 m de profondeur ont permis de reconnaître qualitativement les calcaires coralliens du site et l'équipement en piézomètres a permis de reconnaître la nappe phréatique et le coin salé),
- reconnaissances géotechniques par sondages (11 sondages de surface à la pelle mécanique et au brise roche ont fourni des prélèvements de volumes importants pour réaliser des essais de convenue de matériaux).

##### V.4. Etude de cas, caractéristiques techniques et choix de l'option [Spennato, Golstein, 2012]

La piètre qualité mécanique du rocher, sa forte porosité, la présence du biseau salé ont conduit à revoir le concept initial de l'aménagement qui avait été calqué sur celui d'Okinawa (centrale et circuit d'amenée haute-pression en souterrain).

Seules les solutions terrestres en puits ont été étudiées. Compte tenu également de la hauteur de chute disponible (66 m moyenne), le débit d'équipement (110 m<sup>3</sup>/s)

génère soit des matériels très importants pour les solutions turbines-pompes ou turbines et pompes séparés soit de nombreux matériels standards pour la solution pompes réversibles standard de faible puissance unitaire (Pumps as Turbines, PaT, pompes fonctionnant en turbine en dévirant).

En terme de volume, l'encombrement peut atteindre 15 m de hauteur pour des solutions turbines pompes ou machines séparées et le poids des groupes turbine pompe est de l'ordre de 100 tonnes. Parallèlement les solutions en caissons préfabriqués soit en béton soit en acier ont été développées avec ces mêmes matériels.

La comparaison de l'ensemble des solutions en puits et en caissons a été menée de manière exhaustive.

Le coût prohibitif des solutions des centrales terrestres en puits a conduit au choix de l'option « caisson préfabriqué en acier accosté à la côte et protégé par une digue en mer ». Le « caisson préfabriqué en béton » a été écarté pour des raisons de concept (doutes sur la protection long terme des caissons Jarland, nécessité d'éloignement par rapport à la côte, moindre intérêt pour l'industrialisation).

Il est à noter que les conditions marines de cet aménagement guadeloupéen sont sévères (conditions de houle normale) voire exceptionnellement sévères en cas de houle cyclonique.

Par ailleurs, les matériels de type « pompe-turbine réversible » ou « pompes et turbines séparés » étant particulièrement coûteux l'option retenue pour le projet est celle du caisson-usine préfabriqué en acier équipé de 24 pompes turbines (PaT).

Une alternative d'aménagement avec un circuit hydraulique haute-pression en sub-surface plutôt que souterrain a par ailleurs été étudiée. Les 2 types d'aménagements sont globalement équivalents en coûts, les blindages et ouvrages (massifs en béton et cheminée d'équilibre) de la conduite forcée en sub-surface étant équivalents aux excavations de la solution souterraine.

### V.5. Ouvrages de l'aménagement [M. Ayoub et al., 2014]

Le projet démonstrateur de STEP marine de Guadeloupe est constitué des ouvrages suivants :

- une digue en remblais durs issus des matériaux de déroctage du site, de 10 à 15 m de hauteur,
- créant un bassin d'une capacité utile de 4,7 hm<sup>3</sup> et une emprise au sol de l'ordre de 44 ha,
- une étanchéité intégrale du fond du bassin et des digues (associée à un drainage),
- un circuit hydraulique haute-pression (conduite forcée souterraine ou enterrée) de 5,3 m de diamètre,
- d'une cheminée d'équilibre de 10 m de diamètre et de 15 m de hauteur, dans le cas d'une conduite forcée en sub-surface,

- une usine-caisson en acier, comprenant les équipements électromécaniques, préfabriquée et extérieure, adossée à la falaise et amenée par flottaison en un bloc (Dimensions : 26 x 76 m, hauteur : 15 m, tirant d'eau maximum : 9,3 m, déplacement en opération : 24.000 tonnes),
- une galerie (70 ml) et un puits (55 m de hauteur équipé d'un ascenseur) d'accès du personnel au caisson,
- une digue de protection en mer, fermant l'anse du Petit François, de 21 m de hauteur (dont 9 m émergés afin de tenir compte des cas de charge extrêmes imposés par les conditions cycloniques [Lafon, 2012]), composée d'acropodes pour la carapace, et de filtres en enrochements internes, de largeur en crête : 12 m et de volume 162.000 m<sup>3</sup>. Des daleaux permettant le transit des débits traversent l'ouvrage.

### V.6. Enjeux environnementaux et sociétaux

[Pareto ; F. Jacob et A Barillier 2013, F. Lurel 2013, F. Leblanc, 2013]

Les enjeux environnementaux et sociétaux ont été caractérisés par l'étude des habitats, de la flore et de la faune en saison sèche et en saison humide sur les domaines terrestres et marins. Le niveau de précision acquis est très satisfaisant et permet de préparer une étude d'impact de qualité.

D'un point de vue environnemental le projet de SEPMEI est faisable avec quelques défis techniques sur certains aspects (végétalisation des digues, compensations notamment pour la falaise et dans une moindre mesure avec le plateau et les habitats de chiroptères).

Les études d'insertion paysagère montrent que la conception des ouvrages et les caractéristiques du site sont favorables à une bonne intégration.

La prise en compte des enjeux environnementaux dès cette phase de faisabilité est essentielle et permet d'aborder sereinement la poursuite du projet notamment dans la déclinaison attendue par l'administration de la doctrine Eviter-Réduire-Compenser.

D'un point de vue sociétal, l'absence d'habitations, la présence du parc éolien et l'usage de la terre très limité et ne présentant pas de caractère économique avéré, limite l'enjeu correspondant.

### V.7. Fonctionnement de la STEP

La figure 4 présente la monotone de fonctionnement de la STEP sur toutes les heures de l'année :

La STEP fournit 38 GWh en turbinage durant 3300 h dans l'année. Pour pouvoir toujours fournir 15 MW de

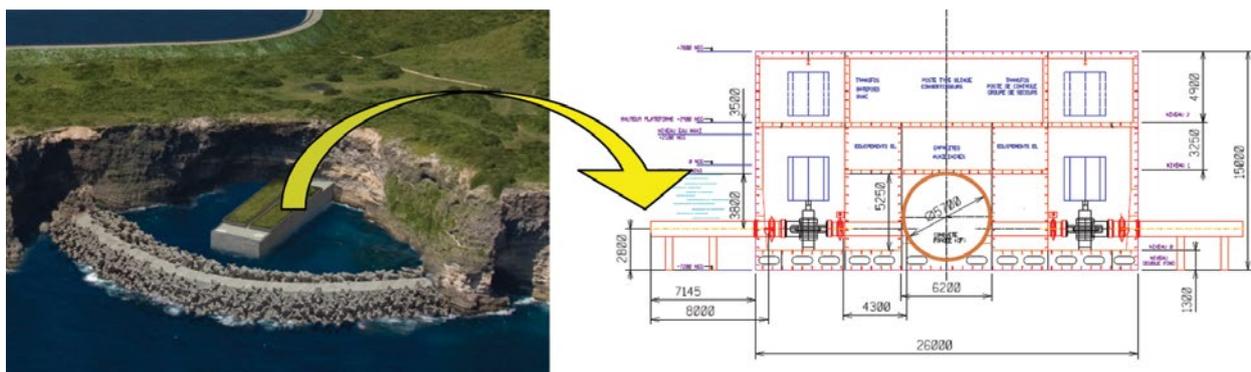


Figure 3 : Vue 3D du caisson acier et de son brise-lame de protection et coupe transversale.

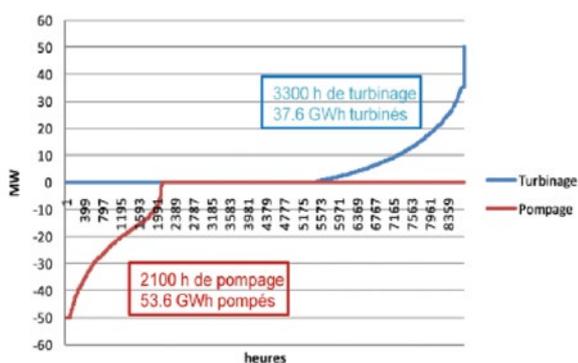


Fig. 4 : Monotone de production de la STEP.

réserve primaire rapide, elle fonctionne presque exclusivement entre 0 et 35 MW. La STEP consomme 57 GWh en pompage durant 2100 h dans l’année. La figure 5 montre le fonctionnement moyen sur la journée. On peut noter qu’à la pointe du soir, le STEP turbine mais ne pompe jamais. La STEP pompe principalement pendant la nuit et pendant le creux d’après midi.

La STEP fournit de la réserve rapide presque à chaque instant. Même si son nombre d’heures de fonctionnement paraît faible, elle est utile au système électrique 100 % du temps (Nota : la turbine et la pompe sont présentes en même temps car il s’agit d’un indicateur statistique).

**V.8. Aperçu du modèle économique**

Dans le cadre de la Directive Européenne 2003/54/EC, la Guadeloupe est considérée comme une Zone Non Interconnectée (ZNI) au réseau métropolitain continental. Conformément au Code de l’Energie la Commission de Régulation de l’Energie (CRE) compense via la Contribution au Service Public de l’Electricité (CSPE) les surcoûts de production de l’électricité et des charges imputables aux missions du service public de l’électricité.

L’article 60 de la dernière loi de finances rectificative de 2012 promulguée le 29 décembre 2012 (qui a modifié l’article L 121-7 du code de l’énergie) vient encadrer le modèle économique du stockage dans les ZNI en permettant la compensation des coûts des ouvrages de stockage d’électricité gérés par le gestionnaire du système électrique dans la limite des surcoûts de production qu’ils contribuent à éviter.

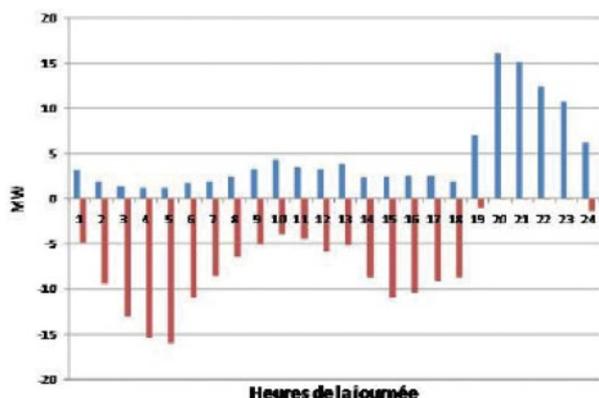


Fig. 5 : Fonctionnement type de la STEP sur une journée.

Dans le cadre réglementaire actuel, les gains liés à l’utilisation de la STEP sont de plusieurs natures :

- gain sur les coûts de combustibles : la STEP pourra être utilisée en pompage en heure creuse et en turbinage en heure de pointe ; cela permettra de remplacer de la production TAC par de la production diesel ou de la production diesel par de la production charbon,
- gain sur les arrêts / démarrages : la STEP permettra de réduire le nombre d’arrêts / démarrages de groupes thermiques (charbon / bagasse ; diesel ou TAC) ; par exemple, à la pointe du soir, la STEP pourra produire à la place d’une TAC et dans les creux de nuit, lorsque la STEP pompera, la demande adressée au parc thermique augmentera et les diesels pourront alors rester en marche la nuit, ce qui évitera de devoir les démarrer le matin,
- gain sur les services système : de part sa conception, la STEP pourra fournir 15 MW de réserve primaire rapide même si toutes les turbines sont à l’arrêt,
- gain sur les investissements en TAC (des renouvellement de TACs 5000 de 20 MW sont en effet prévus à l’horizon de la MSI de la STEP) : la STEP permet de fournir une puissance garantie à la pointe et évite donc l’investissement de deux TAC de 20 MW.

La STEP, grâce à la flexibilité qu’elle offre, peut permettre d’accroître l’insertion d’énergies intermittentes (photovoltaïque et éolien). Cela permettrait de ne pas réaliser de déconnexion dès le seuil des 30%. Le cadre réglementaire actuel ne permet pas de valoriser cette utilisation. Si la réglementation évoluait, la STEP pourrait être utilisée à la place des batteries que les producteurs doivent installer dans le cadre des Appels d’Offre PV + stockage et éolien + stockage et du tarif éolien + stockage.

A noter que du fait des spécificités insulaires et locales (exigence du cahier des charge, zone sismique et cyclonique surcoûts de construction en zone insulaire), le coût du kW installé de la STEP Guadeloupe est élevé (de l’ordre de 5500 €/kW) et nécessite, afin d’être rentable, en plus de la compensation CSPE (basé sur le gain du bilan énergétique valorisé), un montant d’aide publique significatif qui pourrait être obtenu par des subventions du Grand Emprunt (CGI/ADEME), des Régions (Guadeloupe et Pays de la Loire), du Conseil Général Guadeloupe et du FEDER. A noter que le coût d’investissement se répartit en 50 % pour le GC (y compris ouvrages maritimes, 10 %) et 40 % pour le caisson équipé.

**VI. EMERGENCE DE LA FILIERE STEP MARINE**

Une étude préliminaire de marché au niveau mondial des STEP marines a été réalisée et a montré un véritable besoin d’ouvrages de stockage sur la période 2020/2050 pour intégrer dans les systèmes électriques les ENR intermittentes qui vont fortement se développer dans toutes les régions du monde (éolien terrestre et offshore, photovoltaïque). Les principaux résultats de cette étude préliminaire de marché sont les suivants (cf. tableau 1 et tableau 2) :

- même avec des hypothèses très conservatoires, le besoin de stockage par STEP marine atteint quelques milliers de MW en France et dans les pays limitrophes et plusieurs dizaines de milliers de MW dans le reste du monde,
- le potentiel de sites qui peuvent être équipés par des STEP marines, même avec des critères exigeants (topographie, réseau, environnement), est très important et voisin de quelques milliers d’emplacements.

Tableau 1 : Récapitulatif du besoin de stockage en 2050 pour les 56 pays sélectionnés.

Pays	Besoin en stockage				Pays	Besoin en stockage			
	Report de charge (GW)	Intermittence (GW)	Total (GW)	STEP marine (MW)		Report de charge (GW)	Intermittence (GW)	Total (GW)	STEP marine (MW)
Pays-Bas	5	3	8	80	Algérie	6	-	6	60
Allemagne	24	20	44	435	Tunisie	2	-	2	20
France	18	7	25	252	Libye	1	-	1	10
Royaume-Uni	19	33	52	523	Egypte	16	5	16	160
Belgique	3	0	3	29	Soudan	7	-	7	70
Danemark	2	6	8	82	Chili	5	1	5	53
Irlande	2	6	8	75	Pérou	2	1	2	21
Grèce	13	4	17	173	Équateur	1	0	1	10
Italie	3	5	8	77	Venezuela	6	2	6	57
Portugal	3	1	4	37	Costa Rica	1	0	1	6
Espagne	14	6	20	197	Mexique	17	6	17	171
Croatie	1	0	1	9	Canada	34	9	34	343
Monténégro	0	-	0	0	Etats-Unis	194	37	194	1936
Bosnie-Herzégovine	0	-	0	0	Australie	14	4	14	141
Slovénie	0	1	1	14	Nouvelle-Zélande	2	1	2	24
Albanie	0	-	0	3	Oman	1	0	1	7
Pologne	8	5	13	132	Turquie	8	2	8	83
Lituanie	0	-	0	0	Géorgie	0	0	0	4
Estonie	0	-	0	4	Myanmar	0	0	0	5
Lettonie	0	-	0	4	Chine	606	241	606	6060
Bulgarie	1	1	2	21	Corée du Sud	31	8	31	307
Roumanie	4	0	4	41	Russie	46	9	46	461
Ukraine	9	-	9	86	Inde	128	52	128	1284
Suède	7	5	12	116	Indonésie	13	4	13	133
Finland	3	2	5	53	Cap-Vert	0	0	0	0
Norvège	5	7	12	118	Canaries	1	0	1	6
Islande	0	0	0	3	Açores	0	0	0	1
Maroc	6	1,6	8	76	Hawaï	1	1	1	10

En termes de marché mondial des STEP marines, 2 segments seront porteurs :

- les « petites hauteurs de chute » (50 m << 100 m), pour lesquelles la solution caisson avec petites pompes/turbines est optimale comme dans le cas de la Guadeloupe mais également avec Turbines/Pompes dans certains cas,
- les « hauteurs de chute moyenne » (100 m << 200 m) pour lesquelles la solution caisson sera adaptée avec des grosses turbines/pompes et non plus des petites pompes/turbines.

La solution caisson peut donc répondre à la majorité des cas de figure du marché (pour autant que les conditions marines soient favorables). Ses avantages sont la standardisation (industrialisation), la compacité, la rapidité de réalisation (peu dépendante des conditions de site et en particulier

la géologie), des aléas limités, une fiabilité et une compétitivité meilleure que pour des solutions d'usine réalisée classiquement à terre (surtout si la géologie est difficile), la technologie très adaptée pour des clés en mains et la facilité et rapidité d'installation et démantèlement.

Du fait de sa spécificité, le coût brut d'investissement de la STEP de Guadeloupe est élevé et il se pose la question de la viabilité économique de cette technologie à terme. Pour tenter de définir une trajectoire des coûts d'investissement associée à la courbe d'apprentissage, plusieurs scénarios de lieux d'implantation et de puissance ont été retenus pour être valorisés à partir d'extrapolations du cas de base SEPMEI. Cette première analyse montre que les coûts au kW installé peuvent se réduire de manière notable déjà

Tableau 2 : Nombre de sites obtenus par pays et par types.

Pays	Nb de sites		Pays	Nb de sites	
	Plateau	Collinaire		Plateau	Collinaire
Allemagne	0	0	Chili	49	81
France	17	59	Venezuela	0	17
Royaume-Uni	69	25	Mexique	17	32
Italie	50	26	Canada	43	88
Espagne	56	57	Etats-Unis	12	20
Pologne	0	0	Australie	42	73
Ukraine	6	21	Turquie	13	69
Suède	6	20	Chine	0	23
Norvège	30	148	Corée du Sud	3	13
Maroc	45	30	Russie	31	86
Algérie	14	53	Inde	6	10
Egypte	7	16	Indonésie	46	157
Soudan	0	0			

dans les zones insulaires si le site présente une meilleure hauteur de chute et n'est pas soumis aux séismes et aux cyclones et de manière très significative (inférieurs à 1500 €/kW) pour des projets de grande capacité en zone continentale et avec des hauteurs de chute favorables. A noter qu'il existe de nombreux sites de ce type au Royaume Uni.

## VII. CONCLUSIONS

Les études menées sur le projet de STEP marine de Petit Canal confirment sa faisabilité et montrent que la meilleure option technico-économique consiste en une usine caisson préfabriquée équipée de pompes réversibles. Cette solution technologique comporte en outre l'intérêt d'être industrialisable et réalisable dans des délais 2 fois moindres qu'avec des solutions traditionnelles. Un option plus proche de l'optimum économique avec un dimensionnement réduit (puissance d'équipement inférieure permettant d'atteindre les objectifs à 30 ans et minimisant ainsi les montants d'investissement) est actuellement à l'étude. La filière STEP marine peut émerger d'un point de vue technique en particulier avec la solution technologique du type caisson préfabriqué équipé soit de pompes réversibles soit de turbines/pompes.

Il a été mis en évidence que la courbe d'apprentissage pourrait conduire à des coûts de construction inférieurs à 1500 €/kW (hors raccordement) compétitifs avec ceux de STEP terrestres dans le cas de suréquipements (lorsqu'il existe un des deux réservoirs).

La faisabilité de tels projets en zone continentale européenne nécessite néanmoins une évolution législative (loi littoral).

La rentabilité de tels projets de STEP marines, à l'instar de STEP terrestres, reste dépendante du contexte réglementaire qui pour l'instant ne favorise pas le développement de ces projets en France continentale.

## VIII. REFERENCES

- AYOUB M., E. NOUSSE F. LAFON M. DEVIGNE B. SPENNATO A. BARILLIER F. JACOB B. BADIN (2014) — *Rapport interne EDF CIH de faisabilité IH.STEP-MRNE.FAISA00011.A0, juillet 2014*
- DUVAL C. — *Sepmeri Guadeloupe. Modele Geologique. EDTGG120733a (Rapport Interne Edf)*
- FUJIHARA, TETSUO; IMANO, HARUO; OSHIMA, KATSUHIRO. (1998) — Development of Pump Turbine for Seawater Pumped-Storage Power Plant. *Hitachi Review*. **47(5)** : 199-202
- HIRATSUKA, AKITAKA TAKASHI ARAI, TSUKASA YOSHIMURA (1993) — Sea-water pumped-storage power plant in Okinawa Island, Japan. *Engineering Geology*. **35(3-4)** : 237-246
- IEA — Annex Vi Ii- Hydropower Good Practices: Environmental Mitigation Measures And Benefits. Case Study 01-01: Biological Diversity. *Hydropower Implementing Agreement-Okinawa Seawater Pumped Storage Power Plant, Japan*
- JACOB F., BARILLIER A. (2013) — *Synthèse de la problématique environnementale du projet SEPNERI*
- LAFON (2012) — *Caractérisation des conditions marines. Rapport interne EDF CIH IH.STEP-MRNE.GC00002.B*
- LEBLANC F. (2013) — *Bio évaluation des forêts de Pointe du Petit François (Guadeloupe) par l'étude de l'activité des guildes de chiroptères*
- LUREL F. (2013) — *Inventaires Milieux Terrestres - Etude Végétation Flore et Ecologique - Gros Cap Petit-Canal*
- PARETO (2013) — *EDF, Guadeloupe : Etude de faisabilité du projet SEPNERI. Rapport Final, PHASE1 : Etat initial, PHASE 2 : Evaluation des incidences du projet.* 117 p + annexes
- SPENNATO, GOLSTEIN (2012) — Description et pré-dimensionnement des équipements électromécaniques. *Rapport interne EDF CIH IH.STEP-MRNE.EM00001.A0*
- TANAKA KUNINORI, KATSUHIRO OSHIMA, HARUO IJIMA, KOJI TACHIBANA, AND TERUAKI NAMBA — *Study On 800m-500mw Seawater Pumped Storage Unit*