



**HAL**  
open science

**PHAeTON - PrÉvision du Potentiel solaire et éolien à Haute résolution spAtiale et Temporelle pour le dimensionnement et la gestion de micro-réseaux autONomes avec stockage hydrogène (AAPG2021 de l'ANR - préproposition soumise, non retenue)**

Béatrice Morel, Michel Benne, Vincent Bertrand, Ylenia Curci, Cédric Damour, D. Grondin, Julien Pergaud, Nathalie Rodet-Kroichvili, Sylvie Malardel, Jean-Marc Nicod, et al.

► **To cite this version:**

Béatrice Morel, Michel Benne, Vincent Bertrand, Ylenia Curci, Cédric Damour, et al.. PHAeTON - PrÉvision du Potentiel solaire et éolien à Haute résolution spAtiale et Temporelle pour le dimensionnement et la gestion de micro-réseaux autONomes avec stockage hydrogène (AAPG2021 de l'ANR - préproposition soumise, non retenue). 2020. hal-04565410

**HAL Id: hal-04565410**

**<https://hal.univ-reunion.fr/hal-04565410>**

Preprint submitted on 1 May 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

<b>AAPG2021</b>	<b>PHAeTON</b>	PRC
Coordonné par :	Béatrice MOREL	42 mois
CE05 : Une énergie durable, propre, sûre et efficace	Financement demandé : 536 k€	

## Prévision du Potentiel solaire et éolien à Haute résolution spAtiale et Temporelle pour le dimensionnement et la gestion de micro-réseaux autONomes avec stockage hydrogène

### I. Contexte, positionnement et objectifs de la pré-proposition

En France, la loi sur la transition énergétique vise à augmenter la part des énergies renouvelables à 32% d'ici 2030. Cela nécessite d'agir sur le système énergétique dans sa globalité pour changer de paradigme sur la production, la distribution et la conversion de l'énergie. En effet, le modèle d'une unité de production centralisée, contrôlée en fonction de la consommation instantanée doit être totalement révisé en raison du caractère intermittent de la production électrique à partir des Énergies Renouvelables Variables (EnRV) et spatialement distribuées comme le solaire et l'éolien. Afin de simplifier le processus de transition et faciliter l'intégration des EnRV, il est intéressant de développer l'autoconsommation : les producteurs consomment localement leur propre énergie par le biais de petites unités de production électrique qui ne modifient pas (ou peu) l'infrastructure énergétique existante. Un nouveau défi apparaît puisqu'il s'agit d'équilibrer la production et la consommation d'un grand nombre de sites distribués, d'assurer les continuités de service et la qualité de l'énergie délivrée [1]. Le problème est encore plus aigu dans le cas des sites isolés alimentés par des micro-réseaux autonomes avec générateurs, éléments de stockage et charges au niveau local, qui ne bénéficient pas du recours à la connexion à un réseau de grande puissance en cas de déséquilibre.

**Le projet PHAeTON vise à contribuer à une gestion intelligente de l'énergie au sein de micro-réseaux isolés.** Le contexte applicatif est le contexte local de l'île de La Réunion, car il est représentatif de la complexité du climat dans les tropiques et où l'isolement et l'insularité rendent critique l'autonomie énergétique [2]. Dans ce projet, les EnRV considérées sont l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne caractérisées par une forte variabilité à différentes échelles spatiales et temporelles induite par les phénomènes météo-climatiques [3]. Incontrôlable par nature, mais prévisible dans une certaine mesure à courte et longue échéance, cette variabilité peut être compensée par l'utilisation de moyens de stockage : batteries pour le court terme et hydrogène pour le long terme [4]. **PHAeTON vise à développer des approches méthodologiques et des algorithmes de dimensionnement et de gestion de ce type d'unités de production électrique robustes aux erreurs de prévision, en intégrant des dimensions météo-climatiques (prévision des sources d'EnRV à différentes échelles temporelles), énergétiques (prévision et optimisation des flux, dimensionnement des systèmes) et économiques (coûts et bénéfices associés aux technologies et à leurs interactions, économies d'échelle, impact des incitations).**

#### Défis visés par le projet

**Défi n°1 : La prévision sans discontinuité temporelle, à l'échelle locale, des sources d'EnRV.** Le projet exploitera des bases de données existantes pour évaluer le potentiel prédictif d'une chaîne de **prévision des sources d'EnRV (solaire, éolien) à très haute résolution spatiale (~1km)** sur La Réunion, sur les horizons temporels d'intérêt pour le dimensionnement et la gestion des systèmes autonomes (défis 2 et 3) : prévisions du temps (échelle synoptique) du modèle opérationnel Arome (Météo France) ; prévisions climatiques des projets S2S et C3S (échelles infra-saisonnnières à saisonnières) d'un ensemble de modèles globaux [5,6]. Si les prévisions du temps sont disponibles à des résolutions spatiales fines (2.5km) sur La Réunion, les prévisions climatiques ont des résolutions spatiales insuffisantes (~100km) pour représenter les caractéristiques propres à l'île [3]. Le défi majeur posé par la volonté d'améliorer la résolution spatiale des prévisions sur La Réunion est la **descente d'échelle**. Le projet comparera la **méthode dynamique** (basée sur les simulations à longue échéance du modèle Arome qui seront réalisées dans le cadre du projet Interreg PISSARO porté par le LACy) et différentes **méthodes statistiques** (prévision parfaite, analogues, "machine learning", etc.). L'approche statistique qui présente l'avantage sur l'approche dynamique, de la simplicité de mise en œuvre et de l'économie de calculs, sera privilégiée dans ce projet.

**Défi n°2 : Le dimensionnement d'un système autonome avec stockage hybride.** Le dimensionnement optimal des installations, c'est-à-dire leur puissance nominale et/ou leur capacité pour une fiabilité maximale au coût le plus faible, est généralement réalisé sur la base de données historiques et de scénarios. L'intégration des EnRV dans le dimensionnement reste un défi du fait des caractéristiques des

<b>AAPG2021</b>	<b>PHAeTON</b>	PRC
Coordonné par :	Béatrice MOREL	42 mois
CE05 : Une énergie durable, propre, sûre et efficace		Financement demandé : 536 k€

ressources énergétiques (solaire, éolien) aux profils à forte variabilité spatiale, temporelle et multi-échelle sur plusieurs ordres de grandeurs, et de celles des moyens de stockage. Si des méthodes de dimensionnement pour ce type de système existent (telles que développées par exemple dans le cadre du projet ANR DATAZERO [7]), elles présentent des difficultés en termes de temps de calcul, de prise en compte des scénarios de différentes natures (météo-climatiques et économiques) ou encore d'influence des données utilisées (résolution temporelle, localisation). Dans ce projet, les solutions de dimensionnement bénéficieront de la juste précision des prévisions des ressources énergétiques issues du défi 1 et seront alimentées par les contraintes économiques issues du défi 5.

**Défi n°3 : La gestion prédictive et adaptative du système.** La gestion des différents composants (production, stockage, charges) dépendant des prévisions de production et de consommation, de leurs incertitudes (défi 1) mais également de leur dimensionnement (défi 2) et des contraintes socio-économiques (défi 5), une stratégie de gestion à deux niveaux est nécessaire. Le premier niveau réalise une planification d'utilisation des composants à l'échelle de quelques heures à quelques jours (**gestion optimale hors ligne** par programmation dynamique sur des profils d'irradiance de référence), puis le second niveau réalise l'implémentation d'une stratégie de **contrôle en temps réel** pour la prise en compte des **incertitudes/erreurs de prévision**.

**Défi n°4 : L'évaluation et l'analyse comparative des algorithmes de gestion de l'énergie.** Afin d'évaluer les résultats de gestion de l'énergie, notamment vis-à-vis des granularités spatiales et temporelles développées pour la prévision météo-climatique, des **métriques statistiques** (techniques, économiques, environnementales, sociétales, etc.) doivent être définies. Elles seront mises en œuvre afin de définir le meilleur compromis entre effort de calcul et performances des stratégies de dimensionnement et de gestion. Ces résultats permettront alors une **rétroaction** sur le micro-réseau, tant en termes de dimensionnement que de gestion (défis 2 et 3). Pour permettre une réplification à d'autres cas d'étude, une plateforme numérique permettant le **benchmark des stratégies** de dimensionnement et de gestion sera développée et ouverte à la communauté.

**Défi n°5 : L'évaluation économique des technologies et des services et l'estimation des effets sur la précarité/pauvreté énergétique.** Parmi les applications proposées, le projet étudiera 1) la prise en compte de la **valeur associée au stockage** : offre de flexibilité (valorisée sur les mécanismes centraux ou à travers l'équilibrage et la mutualisation entre micro-réseaux au niveau local), coûts évités (coût de renforcement des réseaux, "Value Of Lost Load", etc.), vente d'hydrogène vert ; 2) la **valeur des interactions entre EnRV et stockage** : "curtailment" évité grâce au stockage, augmentation des durées de fonctionnement et économies d'échelle, services aux réseaux ; 3) la prise en compte de l'**impact des mécanismes incitatifs et de marché** dans les calculs de coûts, de rentabilité et de dimensionnement : prix du carbone, feed-in-tariffs, garanties d'origine pour l'hydrogène vert. Des seuils de rentabilité ("breakover points") pourront être calculés pour chaque instrument dans différentes configurations ; 4) les **impacts du développement des micro-réseaux sur la pauvreté/précarité énergétique** à La Réunion où l'accès universel à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable représente un défi d'envergure.

#### Programme de travail pour répondre à ces défis

##### **Tâche 1 : Gestion du projet et communication (Durée : M1-M42)**

T1.1 : Gestion du projet

T1.2 : Communication

Livrables : site web, réseaux sociaux, compte-rendus de réunions, workshops, événements grand public

##### **Tâche 2 : Prévision des ressources énergétiques (Durée : M1-M36)**

T2.1 : Collecte des données de prévision existantes toutes échelles de temps et d'espace (M1-M6)

T2.2 : Méthodes de descente d'échelle pour l'adaptation locale des prévisions sur La Réunion (M4-M16)

T2.3 : Evaluation de la prévisibilité à différentes échelles spatio-temporelles (M16-M24)

T2.4 : Production systématique des prévisions régionalisées sur La Réunion (M24-M36)

Livrables : articles scientifiques, bases de données de prévision des ressources (solaire, éolien)

##### **Tâche 3 : Dimensionnement et gestion prédictive et adaptative de l'énergie (Durée : M6-M42)**

T3.1 : Dimensionnement des composants du système (M6-M24)

<b>AAPG2021</b>	<b>PHAeTON</b>	PRC
Coordonné par :	Béatrice MOREL	42 mois
CE05 : Une énergie durable, propre, sûre et efficace		Financement demandé : 536 k€

T3.2 : Gestion prédictive et adaptative de l'énergie (M18-M42)

Livrables : articles scientifiques, algorithmes de dimensionnement et de gestion de l'énergie

**Tâche 4 : Analyse comparative des stratégies de gestion de l'énergie (Durée : M24-M42)**

T4.1 : Définition du cas d'étude (La Réunion) à modéliser (M1-M6)

T4.2 : Analyse comparative des stratégies de gestion de l'énergie (M18-M42)

T4.3 : Défi (national voire international IEEE) sur la gestion de l'énergie (M30-M42)

Livrables : articles scientifiques, rapports techniques, modèle pour l'analyse comparative, défi

**Tâche 5 : Evaluations économique et technico-économique (Durée : M6-M42)**

T5.1 : Analyse de la rentabilité économique de ces systèmes par rapport aux solutions actuelles

T5.2 : Analyse des verrous économiques potentiels au déploiement des solutions proposées

T5.3 : Analyse des impacts du développement des micro-réseaux sur la précarité/pauvreté énergétique

Livrables : articles scientifiques, rapports d'étude et d'enquêtes, recommandations, conférences

La réalisation de ces travaux s'appuiera sur les personnels permanents des partenaires et sur des personnels recrutés pour le projet (certains en lien avec deux partenaires) : **3 thèses** dont 1 sur la gestion de l'énergie (Energy lab / FCLAB FEMTO-ST), 1 sur la prévision des EnRV (Energy-Lab / FCLAB Biogéosciences / LACy) et 1 sur l'analyse économique de la valeur du stockage et de la flexibilité (FCLAB FEMTO-ST / FCLAB CRESE / CEMOI) pour 315 k€ ; **1 ingénieur** sur la précarité/pauvreté énergétique (CEMOI / FCLAB FEMTO-ST / FCLAB CRESE) : 50 k€ (1 an) ; **4 stagiaires** en appui sur les travaux des tâches 2 à 5 : 12 k€. A ces coûts s'ajoutent les **frais liés aux investissements en électronique** (plateforme hydrogène : 22 k€) **et en informatique** (ressources calcul et stockage : 37 k€), **aux expérimentations** (achat de consommables et matériels : 20 k€, des plateformes existantes seront utilisées), **aux déplacements** pour réunions de projet et conférences (FCLAB dont enquêtes terrain : 16 k€, Energy lab : 12 k€, CEMOI : 6 k€, LACy : 6 k€) et les **frais de gestion** (8%). L'aide totale demandée est de **536 k€**.

#### Caractère novateur et positionnement du projet

L'idée phare de PHAeTON est liée à l'**interdisciplinarité** associant des compétences sur la **prévision du temps et du climat**, des compétences sur l'utilisation des **systèmes de stockage**, les **micro-réseaux** et la **gestion d'énergie électrique** et des compétences économiques avec des **analyses sur la valeur des services rendus** (électricité, hydrogène, flexibilité et services aux réseaux), **l'impact des mécanismes incitatifs et de marché** (feed-in-tariffs, tarification du carbone, garanties d'origines échangeables, etc.) ainsi que les **implications en termes d'équité et de précarité énergétique**. La prévision du rayonnement solaire et des vents en surface à différents horizons et avec une résolution spatiale fine (~1km), à laquelle les études existantes n'accordent qu'une importance secondaire dans les stratégies de gestion des micro-réseaux [8], permettra d'améliorer la gestion du risque énergétique à travers la mise en œuvre d'un micro-réseau assurant le meilleur compromis fiabilité, satisfaction de la demande, efficacité, coût en fonction du scénario économique adopté.

#### Positionnement par rapport aux enjeux de recherche de l'axe scientifique choisi

Le projet propose une approche systémique et interdisciplinaire de conception et de gestion prédictive de systèmes autonomes multi-sources avec stockage hybride. Il traite donc directement des points suivants listés dans l'appel à projet : énergies renouvelables (solaire, éolien) ; stockage de l'énergie, hydrogène-énergie ; (micro-)réseaux multi-sources, gestion intelligente de l'énergie ; transition énergétique et Sciences Humaines et Sociales : enjeux sociaux, économiques, techniques, territoriaux ; analyse des conditions économiques de développement et d'implantation (des micro-réseaux).

## **II. Partenariat (consortium)**

Le **LE2P-Energy lab**, le **LACy** et le **CEMOI** sont des laboratoires de recherche de l'**Université de La Réunion**. Energy-lab (UR), représenté par Béatrice Morel, cible l'optimisation de l'énergie électrique en écosystème critique avec des développements sur la variabilité et la gestion et le stockage de l'énergie. Le LACy (UMR 8105 CNRS/Météo-France/UR), représenté par Sylvie Malardel, est impliqué dans la prévisibilité des cyclones tropicaux dans le sud-ouest de l'océan Indien (SOOI). Le CEMOI (UR), représenté par Olivia Ricci, mène des études sur la dépendance énergétique, la transition et la précarité énergétique. Les permanents

<b>AAPG2021</b>	<b>PHAeTON</b>	PRC
Coordonné par :	Béatrice MOREL	42 mois
CE05 : Une énergie durable, propre, sûre et efficace		Financement demandé : 536 k€

participants de l'UR sont Michel Benne (PR, Energy lab), Cédric Damour (MCF HDR, Energy lab), Dominique Grondin (MCF, Energy lab à partir du 31/12/2020), Sylvie Malardel (CR, LACy Météo-France), Béatrice Morel (MCF HDR, Energy lab) et Olivia Ricci (MCF, CEMOI). Béatrice Morel, la coordinatrice du projet, focalise ses recherches sur la variabilité de la ressource. Elle porte le projet Interreg SWIO-Energy (2020-2023) et participe aux projets ANR Hyles (2021-2024), Interreg IOS-net (2019-2022) et FEDER DETECT (2021-2023).

Le **FCLAB**, représentée par Marie-Cécile Péra, est une Unité de Service et de Recherche de l'**Université Bourgogne Franche-Comté (UBFC)** et du CNRS (USR 2007) dont la mission recherche consiste à héberger des projets novateurs et interdisciplinaires opérés par les membres des laboratoires partenaires dans le domaine de l'hydrogène-énergie. Les laboratoires participants au projet sont l'Institut **FEMTO-ST** (UMR 6174 CNRS/UBFC) par les départements Energie (génie électrique), AS2M (optimisation) et RECITS (économie) très impliqués dans l'hydrogène-énergie, **Biogéosciences** (UMR 6282 CNRS UBFC) par l'équipe CRC très impliquée dans les méthodes de descente d'échelle (dynamique et statistique) et l'étude de la variabilité climatique dans la région SOOI, et le **CRESE** (EA 3190 UBFC) très impliqué sur l'économie de l'énergie. Les permanents participants du FCLAB/UBFC sont Vincent Bertrand (MCF, CRESE), Ylenia Curci (MCF, FEMTO-ST), Nathalie Kroichvili (MCF, FEMTO-ST), Jean-Marc Nicod (PR, FEMTO-ST), Marie-Cécile Péra (PR, FEMTO-ST), Julien Pergaud (IE, Biogéosciences), Benjamin Pohl (CR HDR, Biogéosciences) et Robin Roche (MCF HDR, FEMTO-ST) et Christophe Varnier (MCF HDR, FEMTO-ST).

Le consortium formé par ces partenaires permet d'assembler des compétences complémentaires couvrant le génie électrique (FEMTO-ST [9,10], Energy-lab [11]), l'hydrogène (FEMTO-ST [9], Energy-lab [12]), les sciences météo-climatiques (Biogéosciences, LACy, Energy-lab [13]) et les sciences économiques (FEMTO-ST, CRESE, CEMOI [14]). Cette complémentarité SPI/SHS permet de répondre aux questions techniques mais également économiques et sociétales. Plusieurs des partenaires ont déjà collaboré à travers plusieurs thèses et projets, comme FEMTO-ST et Energy-lab [11] ou Biogéosciences, LACy et Energy-lab [3,13].

### III. Bibliographie

- [1] P. Basak *et al.*, "A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, 2012, pp. 5545-5556, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.043>.
- [2] S. Selosse, S. Garabedian, **O. Ricci**, N. Maïzi, "The renewable energy revolution of Reunion island", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, 2018, pp. 99-105, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.013>.
- [3] P. Mialhe, **B. Pohl**, **B. Morel**, J. Trentmann, G. Jumaux, F. Bonnardot, M. Bessafi, J-P. Chabriat, "On the determination of coherent solar climates over a tropical island with a complex topography", *Solar Energy*, vol. 206, 2020, pp. 508-521, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.049>.
- [4] M. Beaudin *et al.*, "Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review", *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, 2010, pp. 302-314, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.007>.
- [5] F. Vitart *et al.*, "The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database", *Bull Am Meteorol Soc*, vol. 98, 2017, pp. 163-173, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0017.1>.
- [6] L. Batté, M. Déqué, "Seasonal predictions of precipitation over Africa using coupled ocean atmosphere general circulation models: Skill of the ENSEMBLES project multimodel ensemble forecasts", *Tellus*, vol. 63, 2011, pp. 283-299, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00493.x>.
- [7] [www.irit.fr/datazero](http://www.irit.fr/datazero).
- [8] A. Agüera-Pérez, J. C. Palomares-Salas, J. J. González de la Rosa, O. Florencias-Oliveros, "Weather forecasts for microgrid energy management: Review, discussion and recommendations", *Applied Energy*, vol. 228, 2018, pp. 265-278, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.087>.
- [9] B. Li, **R. Roche**, D. Paire, A. Miraoui, "Sizing of a stand-alone microgrid considering electric power, cooling/heating, hydrogen loads and hydrogen storage degradation", *Applied Energy*, vol. 205, 2017, pp. 1244-1259.
- [10] N. Herr, **J.M. Nicod**, **C. Varnier**, L. Jardin, A. Sorrentino, D. Hissel, **M.C. Péra**, "Decision process to manage useful life of multi-stacks fuel cell systems under service constraint", *Renewable Energy*, vol. 105, 2017, pp. 590-600.
- [11] F. K/bidi, **C. Damour**, **D. Grondin**, M. Hilairret, **M. Benne**, "Optimal fuel cell and electrolyser Energy Management System for microgrid", *IECON*, 2019.
- [12] C. Lin-Kwong-Chon, B. Grondin-Pérez, J.-J. A. Kadjo, **C. Damour**, **M. Benne**, "A review of adaptive neural control applied to proton exchange membrane fuel cell systems", *Annual Reviews in Control*, vol. 47, 2019, pp. 133-154.
- [13] **B. Pohl**, **B. Morel**, C. Barthe, O. Bousquet, "Regionalizing rainfall at very high resolution over La Réunion island: A case study for tropical cyclone Ando", *Monthly Weather Review*, 144, 2016, pp. 4081-4099, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0404.1>.
- [14] A. Chailan, **V. Bertrand**, M. Buquet, A. Picard, "Time based approach for LCOE and NPV with application to gas power and hydrogen", *Conf. annuelle IAEE (International Association for Energy Economics)*, 2021.