

# **Développement d'un cadre méthodologique et d'une plateforme collaborative pour la planification et pilotage du déploiement territorial massif des énergies solaires urbaines**

## **Directeur et encadrant de thèse :**

Berrah Lamia LISTIC (Directrice), Thebault Martin LOCIE (Co-encadrant)

Courriel : lamia.berrah@univ-smb.fr

## **Déroulement du projet :**

Date de **début** :09/2021

Date de **fin** :08/2024

## **Contexte et enjeux scientifiques**

Le déploiement massif des Energies Solaires (ES) en milieu urbain va nécessiter l'exploitation d'une grande partie des surfaces urbaines disponibles (et donc toitures et façades des bâtiments). Par exemple, la ville de Paris projette de produire l'équivalent de 20% de sa consommation énergétique en énergies renouvelables, dont les énergies solaires qui nécessiterait l'utilisation de 20% du potentiel des toitures [1]. En Suisse, le potentiel PhotoVoltaïque (PV) total si l'ensemble des toitures étaient utilisées représente une production annuelle de 24 TWh, l'objectif national Suisse étant une augmentation de la production PV des ménages de 4TWh d'ici 2035, ce qui représente 1/6 du potentiel disponible en toiture [2]. Il apparaît donc que les objectifs en matière de production d'ES nécessitent une planification performante du déploiement spatial et temporel de ces énergies. De plus ce déploiement devra être en cohérence avec le contexte géopolitique, économique, énergétique, social et environnemental.

Pour atteindre de tels objectifs, l'implication des décideurs locaux est primordiale, car la mise en place de mesures concrètes d'aménagement énergétique dépend fortement du contexte local. Par exemple, en France, les politiques énergétiques doivent être définies à différentes échelles géographiques par les autorités correspondantes pour définir la stratégie adoptée aux contraintes et opportunités qu'offre son territoire. Le déploiement des énergies renouvelables et notamment solaires dans les villes et les territoires est une procédure complexe, multicritère (économique, énergétique, sociale, technique, politique...) et multi-acteurs qui peut sembler écrasante pour les décideurs locaux et chargée de risques et d'incertitudes. Il convient alors de développer des méthodes adéquates et des outils d'aide à la décision à l'échelle du territoire afin de guider les

différents auteurs à travers le processus de planification et le pilotage des énergies solaires urbaines.

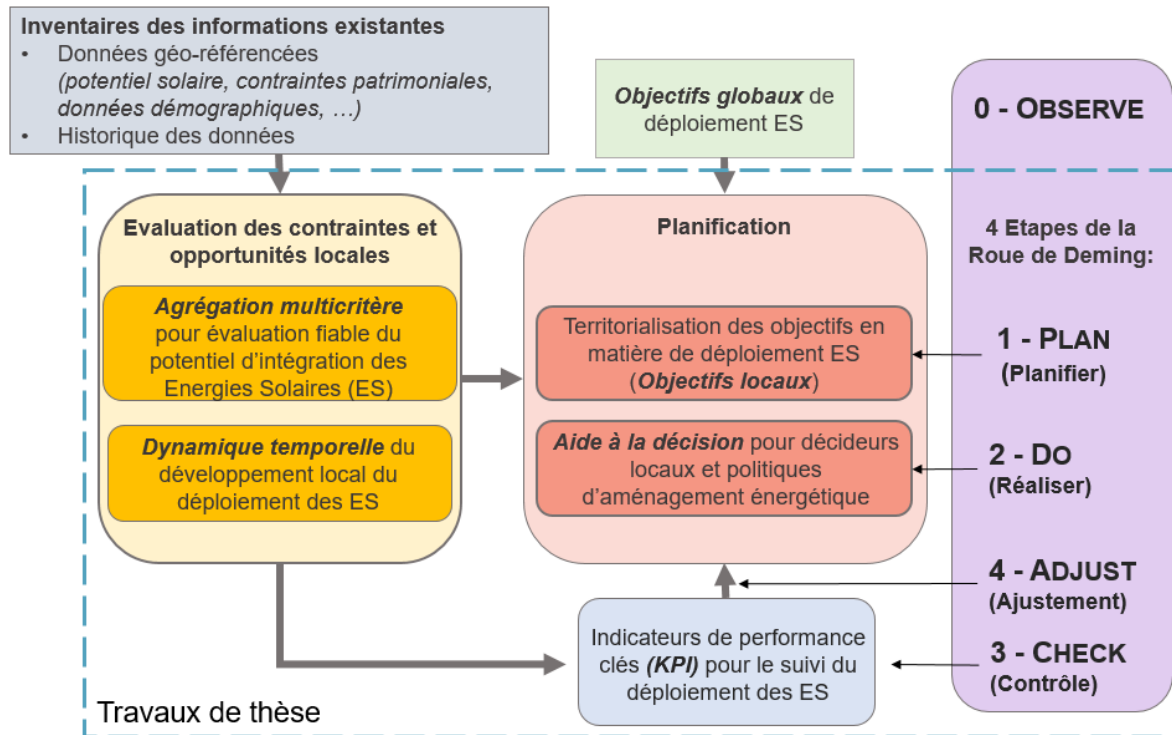


Figure 1: Illustration graphique des travaux de thèse

## Description du travail de thèse

L'objectif de la thèse est de développer un cadre méthodologique pour la planification territoriale et le pilotage du déploiement des énergies solaires (photovoltaïques et/ou thermiques). Massif, ce déploiement a besoin en effet d'un cadre qui couvre l'ensemble du processus qui, de l'expression de la stratégie globale (objectifs énergétique et climatique, nationaux, régionaux), mène vers les actions, indicateurs de performance et tableaux de bord opérationnels. Associé à ce cadre, l'outil cartographique proposé est destiné aux différents acteurs du processus de déploiement (Gouvernement municipaux, Régies énergétiques, Gestionnaires réseaux, Entreprises, Citoyens, etc.) et devra permettre de les guider aussi bien à l'échelle globale (ensemble du territoire) qu'à des échelles plus locales du territoire (communes, quartiers, bâtiments).

Plus précisément, deux postulats seront à prendre en compte dans le développement du cadre méthodologique. L'un concerne le modèle de déploiement et l'autre la cartographie du territoire.

En ce sens, une approche fondée sur les philosophies, largement éprouvés en milieu industriel, d'amélioration continue [3] et qui se fondent sur un principe de d'itération permanente du cycle (Observe-Plan-Do-Check-Adjust) pourra être envisagée [4]. Il s'agira d'identifier les caractéristiques propres aux énergies solaires et leur déploiement en territoire urbain au travers des questions suivantes.

- Quels sont les objectifs en matière de déploiement solaire à l'échelle du territoire ?

- Dans quelle mesure ces objectifs sont-ils atteignables ?
- Comment planifier et piloter, spatialement et temporellement, l'atteinte de ces objectifs ?
- Comment guider les décideurs à travers le déploiement de l'énergie solaire ?
- Quels sont les Indicateurs de Performance Clés (KPI - Key Performance Indicators) à associer aux différentes étapes du déploiement ?

Par ailleurs, une des caractéristiques des énergies solaires à l'échelle urbaine est leur forte décentralisation. Ainsi toute l'étendue du territoire urbain devra être mobilisée pour accroître significativement et efficacement la production de ces énergies. L'utilisation d'outils tels que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sera donc envisagée pour une manipulation de données spatiales du territoire. Ces données représenteront à la fois les situations initiales et les améliorations réalisées en matière de diffusion d'énergie solaire.

### **a – Situation initiale**

Dans un premier temps un état des lieux est nécessaire. Dans un contexte de transition énergétique, les territoires sont une échelle charnière entre les politiques globales et actions locales. Ainsi les objectifs énergétiques globaux d'un territoire doivent tout d'abord être identifiés. Ces objectifs peuvent soit être directement définis par un territoire, soit découler d'objectifs régionaux/nationaux/mondiaux.

En milieu urbain, la maille unitaire du déploiement photovoltaïque correspond au bâtiment, à la fois consommateur et potentiel producteur d'énergie. Cependant l'installation d'un système producteur d'ES sur un bâtiment est conditionnée par de nombreux critères. Ces critères sont d'ordres respectivement énergétique (production énergétiques, potentiel d'autoconsommation...), économique (investissement, temps de retour sur investissement...), environnemental (temps de retour énergétiques, réduction de CO2...), techniques (intégration au réseau électrique local, impact sur la structure du bâtiment, espace disponible en toiture...), esthétique (visibilité, contraintes patrimoniale...), sociale (acceptation...) [5]. Il convient donc d'identifier les critères pertinents ayant un réel impact sur le déploiement de ces énergies, et de caractériser ces critères, pour chaque bâtiment du territoire considéré. A cette fin des outils de Systèmes d'Information Géographique (SIG) seront utilisés car ils permettent une manipulation efficace des données spatiales. La théorie des sous-ensembles flous sera utilisée afin d'affiner la prise en compte des spécifications des données manipulées (incertaines, manquantes, qualitatives, subjectives, etc.).

### **b – Agrégation multicritère et projection temporelle**

La quantité de critères à considérer pour la mise en place d'un système d'ES en milieu urbain rend complexe les décisions liées à son intégration. Cette complexité peut être approchée *via* l'utilisation de méthodes d'agrégation - nette et floue - ou de classification multicritère, permettant de synthétiser l'ensemble des critères en KPI [6], le cas échéant en plusieurs étapes, la multitudes d'informations en un nombre réduit d'éléments permettant la décision. Considérés de manière systémique et associée à chaque toiture d'un territoire, ces indicateurs auront pour rôle de fournir une information fiable du potentiel d'intégration d'un système ES sur les toitures, d'une maille géographique cohérente à définir (quartier, commune, EPCI par exemple). Une telle information aura pour vocation non seulement de piloter mais de communiquer sur les résultats obtenus.

Afin de comprendre les dynamiques territoriales de déploiement des systèmes énergétiques ES il est possible d'étudier l'historique du déploiement de ces énergies. L'analyse de ce développement temporel, couplé aux données identifiés lors des phases a. et b. ci-dessus permettra entre autres :

- d'apporter de la connaissance sur les freins et barrières d'un territoire pour l'adoption du solaire [7] ;
- de développer des projections spatio-temporelles du déploiement des ES (notamment *via* des méthodes d'apprentissage statistique de type régressions [8] ou projections bayésiennes) ;
- d'estimer le degré d'avancement local.

Il sera ainsi possible d'évaluer localement les freins et opportunités au déploiement du solaire, en tenant compte du potentiel technique de déploiement (toitures déjà utilisées et niveau de pertinence des toitures disponibles), associé à la dynamique sociétale locale (zone/quartier/commune à forte acceptabilité, zone à faible acceptabilité).

### **c) Territorialisation des objectifs et aide à la planification**

L'analyse effectuée au point b. permettra de diviser un territoire en plusieurs sous mailles spatiales, chacune ayant des caractéristiques propres vis-à-vis du déploiement des énergies solaires. Dans la suite de ce travail il sera donc possible de territorialiser les objectifs énergétiques globaux. En d'autres termes, afin d'atteindre l'objectif à l'échelle du territoire, il sera possible de définir des objectifs adaptés à chaque commune/quartier de ce territoire.

En parallèle, il sera nécessaire de fournir aux décideurs locaux des tableaux de bord et des outils d'aide à la décision afin de les accompagner dans l'atteinte de ces objectifs. Ils auront en effet besoin d'être informés en permanence non seulement des résultats atteints mais aussi de l'impact des différentes actions envisagées sur l'atteinte des objectifs ainsi que de la « performance » des différentes actions potentielles.

### **e) Méthodologie d'amélioration continue**

Le déploiement des énergies solaires est un processus qui doit être piloté sur plusieurs années. Afin de s'assurer de l'atteinte des objectifs, des méthodes d'amélioration continue peuvent être mise en place (Observe-Plan-Do-Check-Adjust) [3]. A cette fin il sera nécessaire d'associer des indicateurs de performances clés (KPI) aux différentes étapes du déploiement. Définis dans des systèmes, ces indicateurs permettront un suivi cohérent et holistique, et, si besoin, l'ajustement des actions à mener pour l'atteintes des objectifs, depuis les objectifs opérationnels jusqu'aux objectifs stratégiques. Par ailleurs, regroupés dans des tableaux de bord, les KPI auront également pour rôle d'aider à la diffusion des résultats et à la communication entre les différents décideurs impliqués dans le déploiement.

### **f) Cas d'études**

Afin de calibrer et valider les outils et méthodologies développés lors de ces travaux de thèse, deux cas d'études seront envisagés, le Grand Genève (France-Suisse), en effet ces travaux s'inscrivent dans la continuité dans projet INTERREG Franco-Suisse (G2Solaire).

Ces travaux s'inscriront également dans le cadre d'un projet international 'Helios' porté par NTNU Trondheim visant à intensifier l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays nordiques (hautes latitudes). Ainsi les outils et méthodes développées pourront être appliqués dans un cadre socio-économique très différent permettant de tester et d'améliorer leur robustesse, dans une perspective de pouvoir l'appliquer à un très grand nombre de territoire.

### **Références**

- [1] Ville de Paris, Plan climat de Paris, vers une ville neutre en carbone, 100% énergies renouvelables, résiliente, juste et inclusive. 2020.

- [2] A. Walch, R. Castello, N. Mohajeri, et J.-L. Scartezzini, « Big data mining for the estimation of hourly rooftop photovoltaic potential and its uncertainty », *Appl. Energy*, vol. 262, p. 114404, 2020.
- [3] W. E. Deming et D. W. Edwards, *Quality, productivity, and competitive position*, vol. 183. Massachusetts Institute of Technology, Center for advanced engineering study ..., 1982.
- [4] M. Thebault, L.-A. Berrah, G. Desthieux, et C. Ménézo, « Towards a Solar Cadastre For The Monitoring of Solar Energy Urban Deployment: The Case of Geneva », 2019.
- [5] M. Thebault, V. Clivillé, L.-A. Berrah, G. Desthieux, L. Gaillard, et C. Ménézo, « Multi-criteria decision aiding for the integration of photovoltaic systems in urban environment: the case of the Greater Geneva agglomeration », *Territ. Ital.*, vol. 1, n° 1, 2020, doi: doi: 10.14609/Ti\_1\_20\_1e.
- [6] M. Thebault, V. Clivillé, L. Berrah, et G. Desthieux, « Multicriteria roof sorting for the integration of photovoltaic systems in urban environments », *Sustain. Cities Soc.*, p. 102259, 2020.
- [7] M. Graziano et K. Gillingham, « Spatial patterns of solar photovoltaic system adoption: the influence of neighbors and the built environment », *J. Econ. Geogr.*, vol. 15, n° 4, p. 815-839, 2014.
- [8] J. Müller et E. Trutnevyte, « Spatial projections of solar PV installations at subnational level: Accuracy testing of regression models », *Appl. Energy*, vol. 265, p. 114747, 2020.