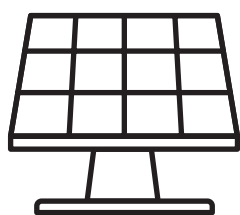




© MyLight Systems



6 TWh

potentiel d'énergie
solaire à l'échelle
de la MGP (Apur)

Le solaire, une ressource stratégique pour la Métropole du Grand Paris

Pour enrayer sa très forte dépendance énergétique et aller vers la neutralité carbone, la Métropole du Grand Paris doit réduire sa consommation mais aussi produire localement une partie de l'énergie qu'elle consomme en valorisant les ressources renouvelables présentes sur son territoire.

Le Plan Climat Air Énergie Métropolitain (PCAEM) fixe un objectif de 60 % d'énergies renouvelables et de récupération dont 30 % produites localement dans le mix énergétique métropolitain à horizon 2050. Parmi ces ressources, l'énergie solaire occupe une place de premier plan avec un potentiel théorique d'environ 6 TWh à l'échelle de la

MGP estimé par l'Apur dans le cadre du Plan Local Énergie en 2015. Conscient des faiblesses opérationnelles de ce premier travail d'estimation, l'Ademe et l'Apur, avec le soutien de la Métropole du Grand Paris, ont décidé de lancer un groupe de travail pluridisciplinaire pour accompagner le développement du solaire sur le territoire métropolitain. À l'heure où les collectivités accélèrent leurs stratégies de transition énergétique, il est nécessaire de leur mettre à disposition des données fiables et partagées et d'y adosser les outils d'aide à décision qui leur permettront d'établir des scénarios réalistes. C'est dans cette optique que s'inscrit la réalisation d'un cadastre solaire 2.0.

État des lieux des travaux et données existantes

Dans le cadre de la réalisation du Plan Local Énergie, l'Apur a étendu le cadastre solaire alors disponible sur Paris¹ à l'ensemble de la Métropole du Grand Paris et a effectué un premier travail d'estimation de potentiel à cette échelle.

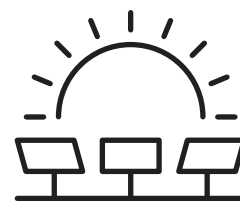
Ce cadastre solaire métropolitain est établi à partir d'une modélisation 3D du bâti métropolitain². La forme et l'orientation des bâtiments et toitures ainsi que les ombres que les bâtiments projettent sur eux-mêmes ou leurs voisins déterminent par calcul l'ensoleillement réel des parties de toiture à un moment donné. On en déduit l'ensoleillement annuel moyen. En revanche, des facteurs comme les règles architecturales, les contraintes techniques (taille des panneaux, occupation des toitures, etc.) et économiques (prix de rachat de l'électricité, coût des panneaux, coût de la maintenance, etc.) ne sont pas pris en considération.

Le cadastre métropolitain réalisé dans le cadre du Plan Local Énergie en chiffres

La Métropole du Grand Paris compte 1,1 million de bâtiments pour environ 150 millions de m² de toiture (27,5 millions pour Paris). Le cadastre solaire fait ressortir 90 millions de m² de toiture bénéficiant d'un ensoleillement moyen supérieur à 800 kWh/m², soit l'ensoleillement jugé suffisant pour envisager l'installation d'un système solaire (14,7 millions pour Paris).

Une étude Elioth / Apur³ qui précise le potentiel solaire sur huit typologies de toitures

En parallèle de l'extension du cadastre solaire et à la demande de l'Apur, le bureau d'étude Elioth a effectué courant 2015 un travail plus précis quant aux possibilités réelles d'insertion de panneaux photovoltaïque et thermique sur huit typologies bâties typiques du territoire métropolitain. L'approche adoptée par cette étude a permis d'estimer la surface de panneaux installable par typologie en prenant en compte les contraintes présentes en toiture et les caractéristiques géométriques des panneaux. Elle a aussi été l'occasion de quantifier les équilibres technico-économiques obtenus entre l'investissement nécessaire et la production d'électricité obtenue (coût actualisé du kWh produit, rendement des installations). Ce travail à petite échelle a notamment permis de développer des processus de traitements automatisés de positionnement automatique des panneaux autour des obstacles, de prise en compte des masques au rayonnement solaire et de simulation de la production d'électricité ou de chaleur au pas horaire.

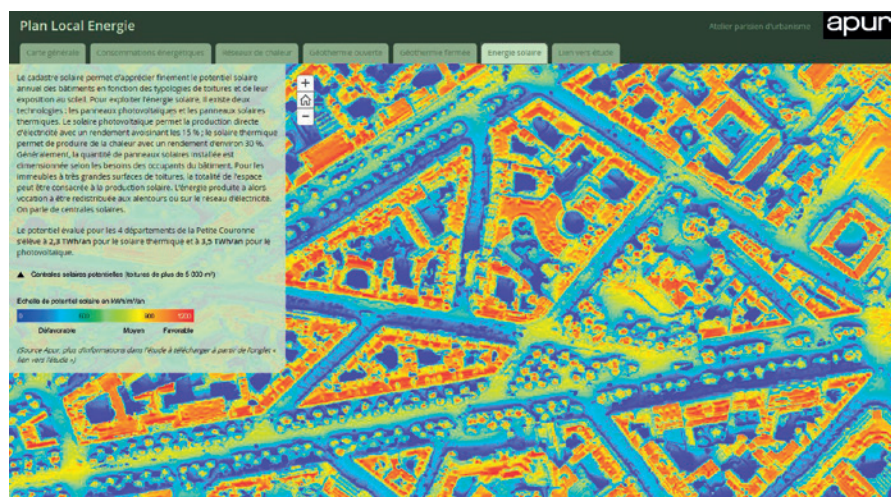


90
millions de m²
de toiture bénéficiant
d'un ensoleillement
suffisant dans
la Métropole

1 – <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/paris-dispose-premier-cadastre-solaire-france>

2 – Le modèle numérique d'élévation (MNE, InterAtlas) est utilisé avec des outils d'analyse de rayonnement solaire (grâce au logiciel ArcGIS d'ESRI) pour calculer l'insolation d'un paysage ou d'emplacements particuliers, en s'appuyant sur les méthodes d'algorithme du champ de vision hémisphérique.

3 – L'étude complète est disponible en ligne : www.egis.fr



Note : Ci-dessus, un extrait de la carte interactive réalisée dans le cadre du Plan Local Énergie (apur.maps.arcgis.com). Elle permet de visualiser le cadastre solaire brut ainsi que sa version simplifiée au bâtiment et renseigne des potentiels à la commune. Une couche SIG au bâtiment du cadastre solaire 1.0 de la MGP est disponible sur l'open data de l'Apur (opendata.apur.org).

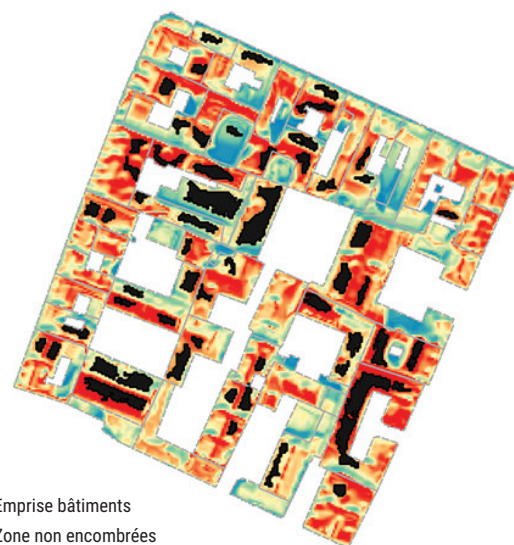
UNE MÉTHODE MISE EN PLACE POUR AFFINER LE GISEMENT AU BÂTIMENT

La méthode développée par Elioth pour prendre en compte les spécificités des différentes typologies de toitures repose sur les trois étapes suivantes :

1

Extraction des zones d'implantation potentielle

La première étape consiste à extraire les pans de toitures qui sont libres d'obstacles, à partir du modèle numérique de terrain. On dégage ainsi les zones directement disponibles, sans qu'aucune surélévation ne soit nécessaire.



2

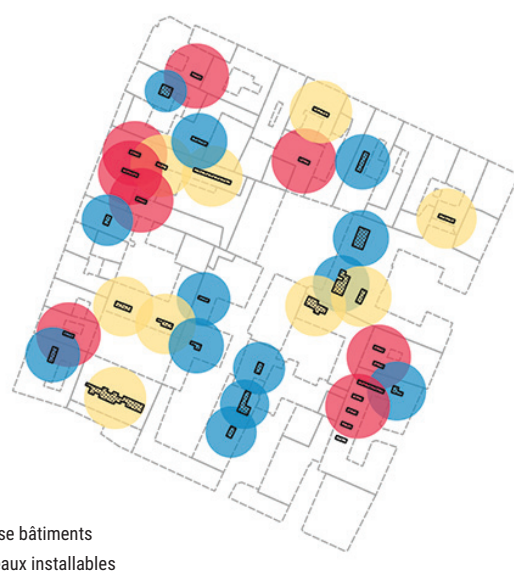


Filtrage et régularisation des zones non encombrées

Étant donné la précision du modèle d'élévation, les formes obtenues précédemment ne correspondent pas à des formes rectangulaires adaptées à la forme des panneaux et doivent être post-traitées.

On obtient ainsi le positionnement optimal de panneaux rectangulaires standards de 1x1,5m, qui maximise la surface de panneaux en s'adaptant à la forme du toit tout en gardant une implantation compacte. Les systèmes sont ensuite filtrés pour ne retenir que ceux qui disposent d'un gisement solaire annuel de plus de 800 kWh/m².

3



Calcul du rendement des systèmes

Les productibles annuels et les rendements de chaque système sont ensuite estimés et cartographiés, à partir d'un modèle horaire prenant en compte l'orientation, la pente, ainsi que le gisement solaire disponible au niveau des panneaux (en prenant en compte les masques environnants).

Les panneaux avec les plus hauts rendements et les coûts par kWh (LCOE) les plus bas sont ainsi identifiés, et permettent de fournir une estimation de la surface de toiture installable et du niveau de production d'énergie à attendre.

Les 8 typologies étudiées

Le territoire de la Métropole du Grand Paris se caractérise par la grande diversité de son patrimoine bâti et donc par des typologies de toits très variées : toits « à la Mansard » des quartiers Haussmannien,

toits terrasses des immeubles plus récents, toits à la française des tissus pavillonnaires... Elles représentent autant de contraintes différentes ayant plus ou moins d'impact sur leur potentiel de captage de l'énergie solaire.

Bilan des résultats sur les huit typologies étudiées

Les principaux résultats de ce travail sont résumés ci-dessous : surface exploitable, rendements moyens et production énergétique par mètre carré de surface utile. L'analyse de la capacité réelle d'intégration de panneaux solaires sur huit ensembles de bâtiments représentatifs des tissus métropolitains révèle des surfaces exploitables qui diffèrent de manière significative et globalement bien en deçà du maximum théorique d'environ 25 % pour une toiture plate complètement dégagée. Les bâtiments anciens du Marais ont le potentiel le plus faible avec seulement 3 % de surface de toiture exploitable

HAUSSMANNIEN

Place Victor Hugo – Paris 16^e



MARAIS

Place du marché Sainte-Catherine – Paris 16^e



IMMEUBLE • 1950

Rue Saint-Just – Ivry-sur-Seine



IMMEUBLE • 1970

Rue Saint-Just – Ivry-sur-Seine



H-B-M

Place de la porte de Châtillon – Paris 14^e



ENTREPÔTS

Rue Victor Hugo – Ivry-sur-Seine



Z.A.C

Place du colonel Fabien – Paris 10^e



PAVILLONNAIRE

Avenue du 8 mai 1945 – Perreux-sur-Marne



© InterAtlas 2015

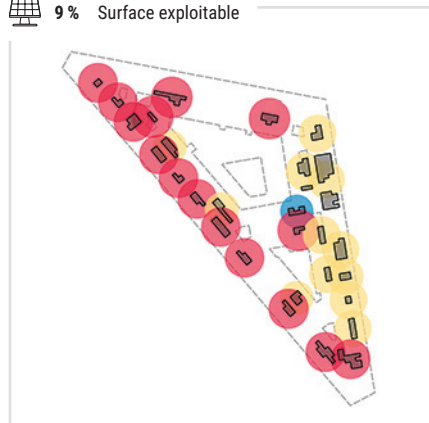
alors que celle-ci dépasse les 15 % sur un ensemble d'entrepôts d'Ivry-sur-Seine. À l'image des entrepôts, le tissu pavillonnaire ressort comme une typologie favorable au développement du solaire avec près de 10 % de surface de toiture

exploitable. Au-delà des résultats sur les huit typologies étudiées, ce travail a surtout permis de développer un modèle de calcul robuste en mesure de tourner sur l'ensemble du stock bâti de la Métropole du Grand Paris.

HAUSSMANIEN

Place Victor Hugo – Paris 16^e

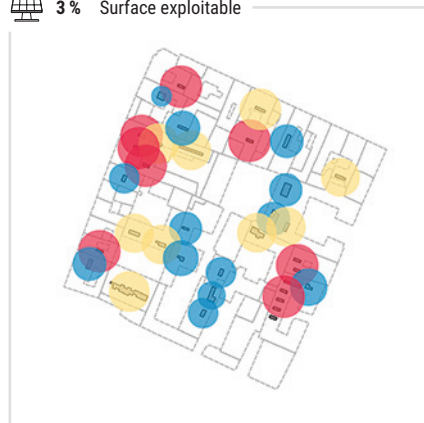
 9 % Surface exploitable



MARAIS

Place du marché Sainte-Catherine – Paris 16^e

 3 % Surface exploitable



RENDEMENT DES INSTALLATIONS

Solaire thermique

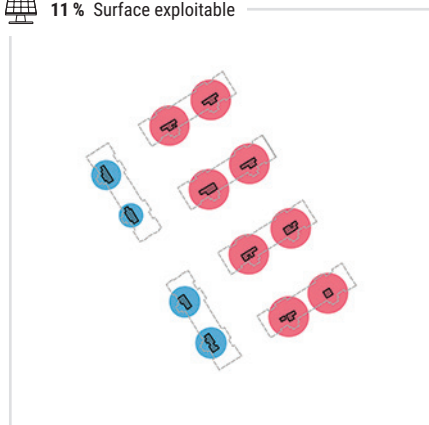
- Potentiel important
- Potentiel moyen
- Potentiel faible

Source : Elioth, Apur

IMMEUBLE • 1950

Rue Saint-Just – Ivry-sur-Seine

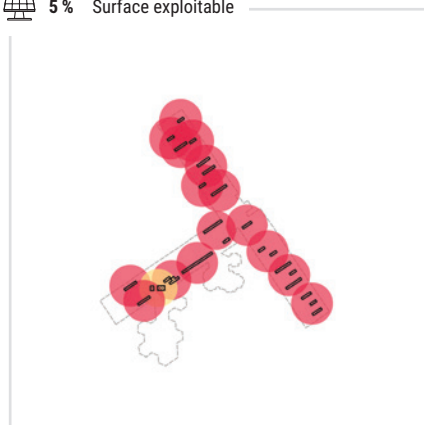
 11 % Surface exploitable



IMMEUBLE • 1970

Rue Saint-Just – Ivry-sur-Seine

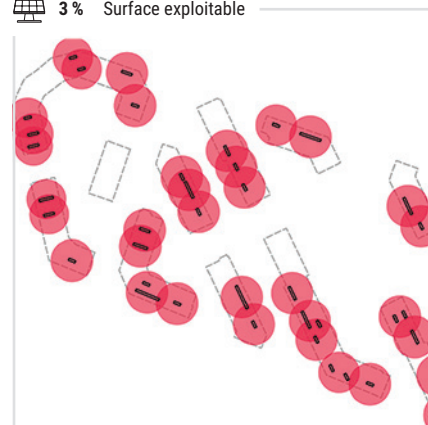
 5 % Surface exploitable



H-B-M

Place de la porte de Châtillon – Paris 14^e

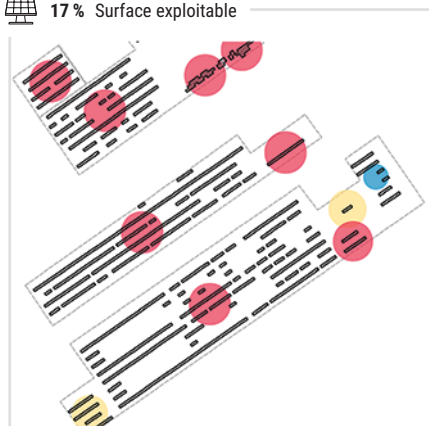
 3 % Surface exploitable



ENTREPÔTS

Rue Victor Hugo – Ivry-sur-Seine

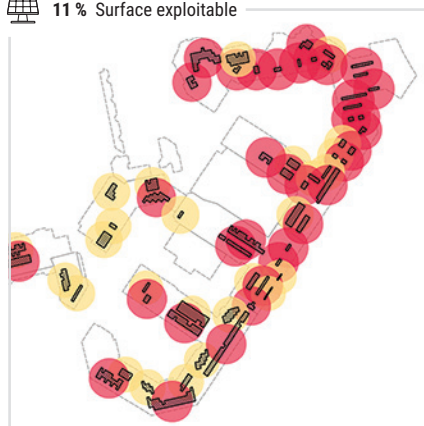
 17 % Surface exploitable



Z.A.C

Place du Colonel Fabien – Paris 10^e

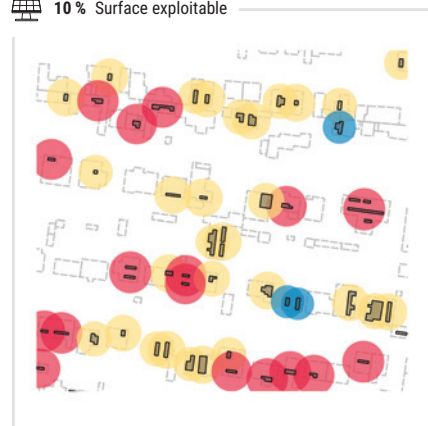
 11 % Surface exploitable



PAVILLONNAIRE

Avenue du 8 mai 1945 – Perreux-sur-Marne

 10 % Surface exploitable

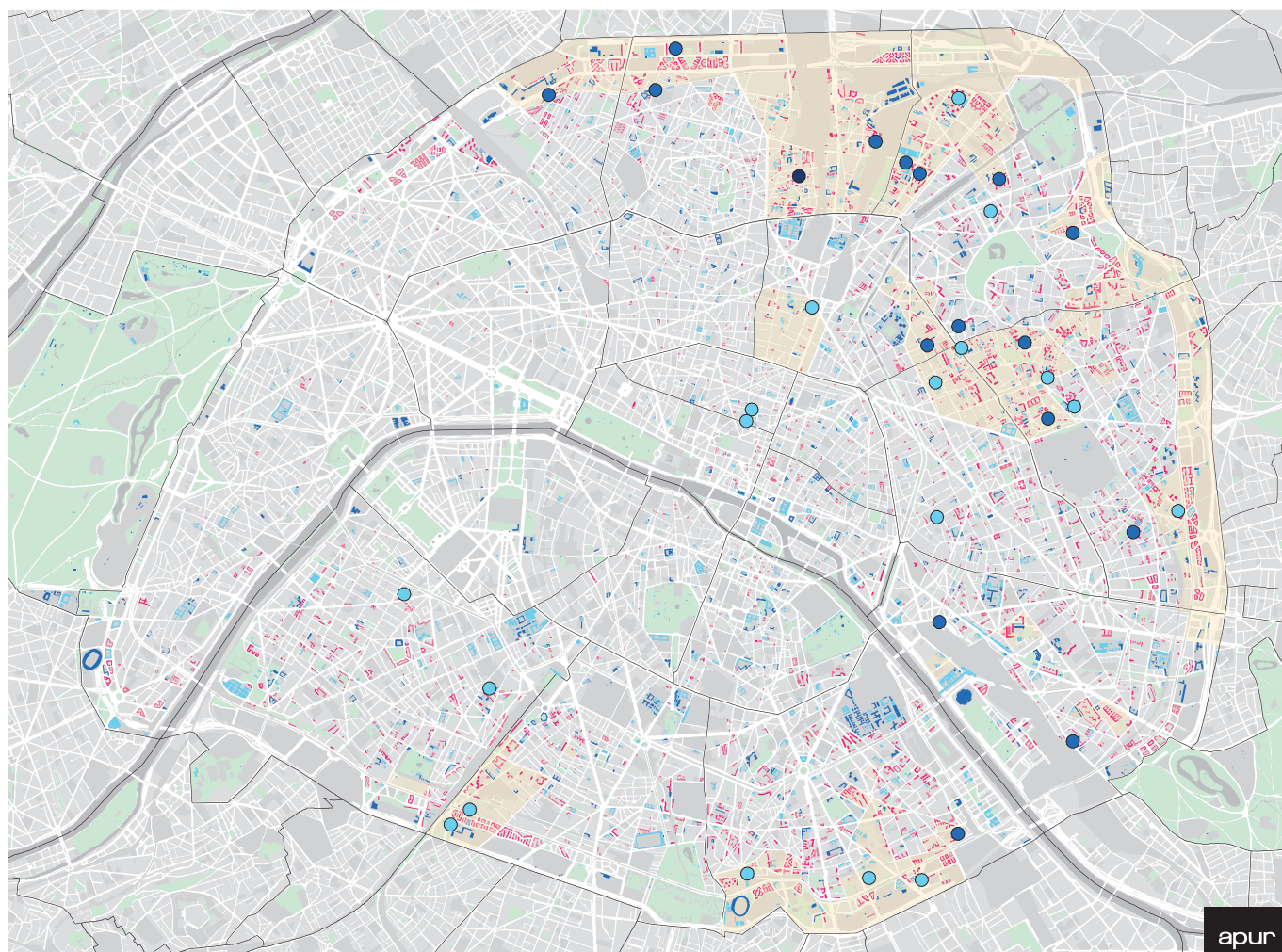


Le projet n° 18 du Budget participatif 2016 – Des quartiers populaires à énergie positive

Adopté en septembre 2016, ce projet prévoit l'installation de panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques sur les toits de logements sociaux et ou équipements municipaux situés dans les quartiers populaires parisiens. Une enveloppe de 2 millions d'euros est adossée à ce projet (budgetparticipatif.paris.fr). Pour compléter ce budget, il est aussi prévu d'expérimenter la participation financière des citoyens à ces projets de production solaire. Une part des recettes ou économies réalisées bénéficiera aux habitants des quartiers populaires : financement d'actions sociales et environnementales ou encore contribution à la baisse des charges. Avec l'aide d'Enercit'if, la ville va également tester des dispositifs innovants comme la création de coopératives de production d'énergies renouvelables dans le cadre

de ce projet. La Ville de Paris a sollicité l'Apur pour hiérarchiser les sites selon leur potentiel solaire et leur nature (logements sociaux selon le bailleur, nature des équipements publics, etc.). L'Apur a alors transmis une liste d'adresses en croisant le cadastre solaire existant et les données urbaines fines. Après une première phase d'études et de procédures en cours de finalisation, le début des travaux est prévu en octobre 2019 pour une livraison en décembre 2020.

La question de la précision des données s'est posée tout au long de ce travail de repérage. L'accès à un outil croisant des données fines en matière de gisement solaire et typologie bâtie aurait permis de réduire le nombre de sites potentiels dès la phase amont du projet.



BUDGET PARTICIPATIF « DES QUARTIERS POPULAIRES À ÉNERGIE POSITIVE »

Centres sociaux

Ensoleillement moyen (kWh/m²/an)

- < 800
- de 800 à 1 000
- > 1 000

Équipements municipaux

Ensoleillement moyen (kWh/m²/an)

- < 800
- de 800 à 1 000
- > 1 000

Logements sociaux

Ensoleillement moyen (kWh/m²/an)

- < 800
- de 800 à 1 000
- > 1 000

Nouveau Quartier Politique de la Ville (NQPV)

Sources : DPA ; DGFiP 2013-2016 ; Ministère de la Ville, de la Jeunesse et des Sports ; Apur
Note : La carte fait apparaître les équipements municipaux, centres sociaux et logements sociaux selon leur potentiel solaire et leur localisation ou non dans des « quartiers populaires ».

L'accès à une donnée fiable comme levier d'accélération : vers un cadastre 2.0

Le passage de la première version du cadastre solaire à un cadastre 2.0 repose sur deux axes de travail : l'approfondissement du gisement solaire à l'échelle du bâtiment avec la prise en compte des spécificités de chacune des toitures et la réalisation d'un outil d'aide à la décision pour valoriser cette donnée et permettre son appropriation par les collectivités et grands gestionnaires de parcs immobiliers.

Une donnée consolidée à l'échelle du bâtiment

L'étude Elioth/Apur fait ressortir l'intérêt de préciser le gisement à l'échelle du bâtiment. Avant tout, le nouveau potentiel devra prendre en compte l'encombrement des toitures ainsi que la taille « standard » des panneaux disponibles sur le marché. Il sera aussi croisé avec les données urbaines fines dont dispose l'Apur afin de caractériser le bâti suivant sa période de construction et sa fonction (habitat collectif, habitat individuel, logement social, équipements publics, bureaux). Début 2019, les données nécessaires à ce travail sont disponibles sur le périmètre de la MGP, l'extension

à l'ensemble du territoire francilien pourra être faite ultérieurement. Les résultats issus de cette modélisation approfondie seront mis à disposition sur l'open data de l'Apur.

Plusieurs pistes supplémentaires peuvent être envisagées :

- Au niveau temporel, la réalisation d'un calcul mensuel et au pas horaire peut permettre de travailler sur des sujets comme l'équilibre consommation-production, l'autoconsommation et l'autoproduction.
- D'un point de vue architectural, l'intégration territorialisée des règles d'implantation des panneaux (PLU et ABF) représente une opportunité de visualisation des leviers d'actions dont disposent les collectivités pour augmenter le gisement disponible.

La valorisation au travers d'un outil d'aide à la décision

La mise à disposition de tous des données consolidées sur le gisement solaire de la Métropole du Grand Paris n'est pas suffisante. Leur interprétation reste complexe pour les non-initiés. Pour permettre l'élaboration de stratégies

territoriales et justifier le choix du solaire pour les gestionnaires de parcs immobiliers, il est nécessaire de proposer un outil d'aide à la décision adapté. Cet outil dynamique pourrait prendre la forme d'une application cartographique web à destination des collectivités et grands gestionnaires de parcs immobiliers ou encore de collectifs citoyens. Il s'appuiera sur un cadastre solaire d'une grande précision et une connaissance fine des tissus urbains (cf. partie a).

Alors que les collectivités et les territoires s'engagent dans l'élaboration des Plans Climat Énergie, l'accès à un outil de simulation sur le gisement solaire est particulièrement attendu par ces dernières pour définir leur stratégie de planification énergétique. Plusieurs territoires de la MGP et franciliens ont sondé l'Apur et l'Ademe à ce sujet après avoir eu échos des travaux engagés dans le cadre du groupe de travail solaire.

Les gestionnaires de parcs immobiliers (bailleurs sociaux, gestionnaire de parc tertiaire) sont des cibles stratégiques du fait de la taille et de la concentration de leur parc mais aussi de leur forte capacité de décision.

Pour permettre l'élaboration de stratégies territoriales et faciliter le choix du solaire pour les gestionnaires de parcs immobiliers, il est nécessaire de proposer un outil d'aide à la décision adapté.

SCHÉMA DE PRINCIPE



De leur point de vue, l'installation des capteurs solaires participe de la valorisation de leur parc et peut contribuer à la réduction de la facture énergétique.

L'outil développé pourrait permettre aux utilisateurs d'étudier et de comparer différents scénarios de déploiement du solaire sur un territoire et un parc immobilier donné. Les futurs utilisateurs pourraient alors visualiser et comparer productible annuel attendu mis au regard de la consommation du territoire, coût des installations, temps retour sur investissement ou encore temps de retour énergétique. Mais aussi définir une stratégie de déploiement optimale à partir d'un « budget solaire » disponible en identifiant les toitures prioritaires comme les grandes surfaces peu encombrées et bien ensoleillées par exemple.

L'outil pourrait être enrichi avec la mise en place d'une dimension participative. L'utilisateur pourrait par exemple renseigner des informations concernant les systèmes dont il dispose (eau chaude collective ou non, chauffage électrique ou non, etc.) et sa consommation afin d'affiner les résultats issus de la simulation.

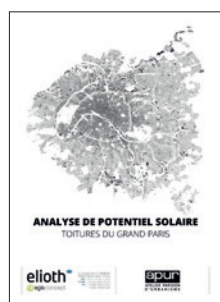
Des initiatives déjà présentes

À ce jour, il existe quelques initiatives récentes d'outils d'exploration qui peuvent proposer tout ou partie de ces services. En France, on peut citer la startup In Sun We Trust dont le service gratuit est en partie basé sur des données mises à disposition par l'IGN.

De telles initiatives proposent un service sur mesure pour les particuliers. Ils peuvent aussi proposer des services adaptés aux collectivités. L'utilisateur se voit proposer un service pour construire son projet solaire : calcul rapide de potentiel, production de devis, mise en relation avec des installateurs certifiés mais surtout accompagnement dans le cadre du montage financier.

Les travaux engagés par l'Apur et l'Ademe sont complémentaires à ces démarches :

- La mise en open data d'une donnée fiabilisée en matière de potentiel solaire pourrait alimenter les initiatives existantes ou en faire émerger de nouvelles.
- La réalisation d'une application cartographique web à destination des collectivités et des grands gestionnaires de parcs immobiliers permettrait de valoriser la connaissance fine des tissus urbains disponible à l'Apur pour simuler des stratégies de déploiement du solaire sur le territoire de la MGP.



Téléchargeable sur le site de l'Apur

Directrice de la publication :

Dominique ALBA

Note réalisée par : **Gabriel SENEGAS**

Sous la direction de : **Olivier RICHARD**

Cartographie et traitement statistique :

Apur

Photos et illustrations :

Apur sauf mention contraire

Mise en page : **Apur**

www.apur.org

L'Apur, Atelier parisien d'urbanisme, est une association loi 1901 qui réunit autour de ses membres fondateurs, la Ville de Paris et l'État, les acteurs de la Métropole du Grand Paris. Ses partenaires sont :

