



ANALYSE DE POTENTIEL SOLAIRE

TOITURES DU GRAND PARIS

15 / 09 / 2015

eliOTH
egis concept

4 rue Dolorès Ibarruri-TSA 80006
93188 Montreuil Cedex - France
site www.eliOTH.com
e-mail contact@eliOTH.fr
tél +33 (0)1 78 42 24 10
+33 (0)1 78 42 73 90

apur
ATELIER PARISIEN
D'URBANISME

Un Plan Local Energie pour accompagner une stratégie métropolitaine

L'accord de Paris, issu de la COP21, prévoit de contenir le réchauffement climatique bien en dessous de 2°C, confortant ainsi l'ambition des objectifs inscrits au niveau régional par le SRCAE (rénovation thermique, essor et diffusion des ENR&R, mobilité).

La consommation énergétique du bâti représente 2/3 des consommations régionales, ce qui confère au cadre bâti un rôle de premier plan face aux enjeux climatiques et énergétiques dans la métropole: réduction des émissions de GES (favoriser les énergies peu émissives, réduire les consommations) et sécurisation des systèmes énergétiques (préserver les infrastructures de transport et de distribution, mutualiser les systèmes et les ressources dans un souci d'économie globale, privilégier les ressources locales, soulager la pointe électrique).

L'atelier parisien d'urbanisme (Apur) travaille depuis 2013 à la mise en place d'un Plan Local Énergie (PLE) à l'échelle de la Métropole du Grand Paris, travaux menés avec de nombreux partenaires dont Elioth particulièrement mobilisé sur le volet des énergies solaires.

Parmi les ressources locales, l'énergie solaire constitue avec la géothermie de moindre importance l'un des principaux gisements d'ENR&R identifiés. Sur la base d'un cadastre solaire élargi au territoire métropolitain, un premier travail mené par l'Apur a ainsi permis d'évaluer un potentiel de 6 TWh (bâtiments résidentiels et centrales solaires). C'est dans l'optique d'affiner cette évaluation mais aussi de mettre en lumière les spécificités de chaque typologie de bâtiment que l'Apur et Elioth ont choisi d'affiner ce premier travail autour de l'intégration de panneaux solaires sur 8 typologies de toitures assez représentatives de la diversité de forme urbaine de la Métropole.

Ces travaux illustrent la nécessité d'actions menées de façon très précises pour assurer l'essor de l'énergie solaire comme pour les autres ressources en énergies renouvelables. Le PLE avec son ensemble de données cartographiées des ressources et consommations d'énergies territorialisées à l'échelle du bâti comme à celle des territoires informe sur ce qui est là et optimise l'adéquation entre les ressources, les besoins, et les réseaux, vis-à-vis du « stock » bâti. En intégrant la connaissance de ces trois éléments, le PLE permet l'élaboration de stratégies territoriales en matière de choix énergétique, de ressources, d'intervention sur le bâti à toutes les échelles et une quantification des actions possibles dans le temps et dans l'espace.

Dominique Alba

Directrice générale de l'Apur, architecte



www.apur.org

<http://www.apur.org/etude/un-plan-local-energie-metropole-paris>

Ce document présente la contribution d'Elioth aux réflexions de l'APUR pour la mise en place d'un Plan local de l'Energie : y sont présentés les enjeux, les opportunités et les contraintes de l'intégration des panneaux solaires photovoltaïques et thermiques pour la métropole du Grand Paris.

I. ENERGIE SOLAIRE (p. 5)

Cette étude rappelle tout d'abord les caractéristiques des deux principales technologies de conversion de l'énergie solaire, photovoltaïque (électricité) et thermique (chaleur basse température, éventuellement froid), et compare leurs avantages et leurs inconvénients techniques et économiques respectifs. Elle présente également les enjeux de l'intégration de ces énergies renouvelables au réseau, avec les notions d'autoconsommation et d'autoproduction pour le photovoltaïque.

II. INTEGRATION EN MILIEU URBAIN (p. 19)

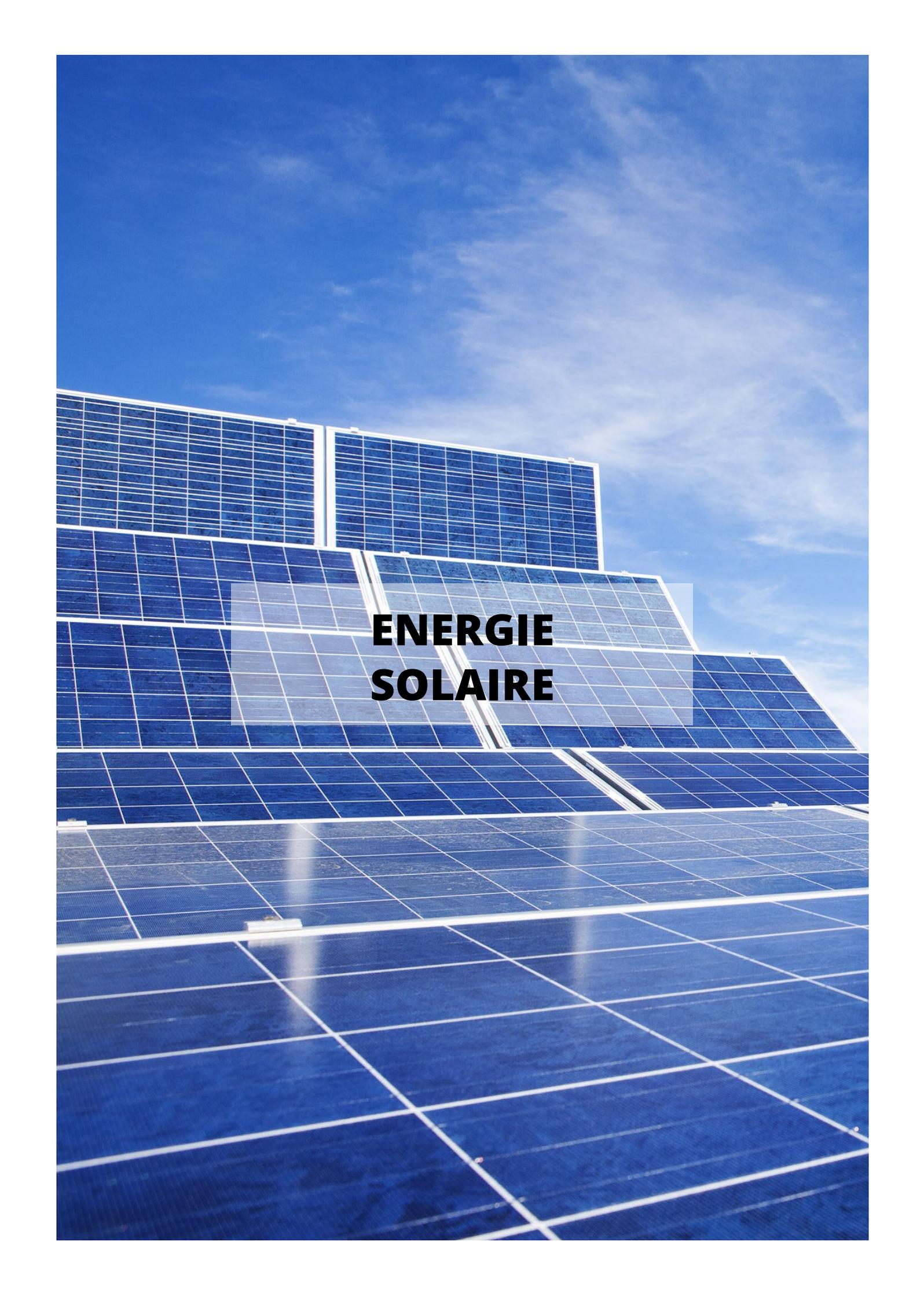
L'étude présente ensuite les résultats de tests d'intégrations de panneaux sur les toitures de types typiques de la métropole, de l'haussmannien au pavillonnaire en passant par les toits terrasses : quel niveau d'obstruction créé par les cheminées, les gaines techniques, les systèmes d'éclairage zénithaux ? quelle proportion de surface installable ? Quels rendements attendre des systèmes installés ?

III. SYNTHÈSE DES RESULTATS (p. 25)

Les résultats de ces tests d'intégration ainsi que toutes les hypothèses prises sont regroupés dans cette partie, pour fournir un moyen de comparaison rapide entre les différentes typologies.

IV. INDEX (p. 70)

III. BIBLIOGRAPHIE (p. 71)

A large array of solar panels is shown under a clear blue sky with some light clouds. The panels are arranged in rows and are tilted at an angle. The text "ENERGIE SOLAIRE" is overlaid in the center of the image.

**ENERGIE
SOLAIRE**



Halle Pajol, Paris
Crédits photos Pascal Poggi

Technologies solaires

Photovoltaïque

Différentes technologies et performances à disposition

L'effet photovoltaïque permet la production directe d'électricité à partir du rayonnement solaire.

Les technologies de cellules photovoltaïques sont de plus en plus variées : les technologies de première génération, aujourd'hui matures, et basées sur les propriétés du silicium cristallin (mono ou poly), sont les plus répandues sur le marché. Les rendements associés sont de l'ordre de 14% à 19%. Cela signifie que pour un rayonnement incident de 1000 W/m², la puissance électrique générée par 1 m² de PV est généralement comprise entre 140 à 190 Wc.

Parallèlement, les couches minces, qui représentent la seconde génération, sont encore dans une phase de développement. Les rendements peuvent atteindre 16%.

Enfin, il existe des cellules actuellement en développement, appelées cellules de troisième génération, mais elles ne sont pas encore sur le marché. Les cellules organiques en font partie.

Le rendement des cellules photovoltaïques peut être amélioré en incorporant des systèmes de trackers aux modules photovoltaïques (PV) : en

suivant la course du soleil, les panneaux sont toujours orientés de manière optimale et produisent plus longtemps au cours d'une journée. La structure de support est cependant plus complexe et demande plus de maintenance.

On peut aussi combiner les PV avec un système de ventilation, pour récupérer la chaleur perdue par les cellules. En refroidissant les modules, l'efficacité augmente.

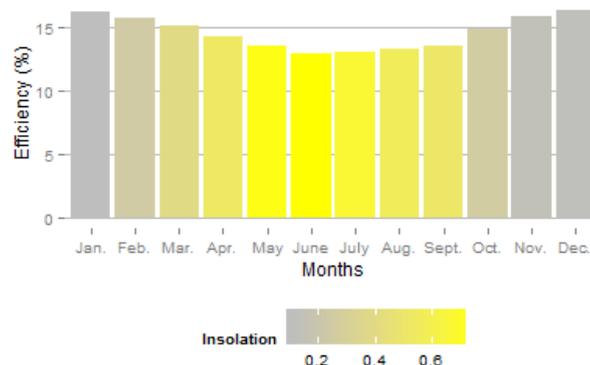
Effacité de conversion du gisement solaire

Le rendement des panneaux photovoltaïques dépend des conditions météorologiques, notamment l'ensoleillement, et la température : le rendement des panneaux sera d'autant plus élevé que l'ensoleillement sera élevé (en W/m²) et que la température sera basse. Surélever les panneaux pour éviter leur surchauffe permet ainsi de garantir cette efficacité de conversion.

Ce rendement est garanti par les constructeurs : au minimum 90% du rendement nominal lors des 10 premières années, et au minimum 80% lors des 15 suivantes.

Evolution de l'efficacité d'un module PV au cours de l'année

Elioth, 2015



Photovoltaïque

Emissions de gaz à effet de serre

Parmi tous les moyens de production d'électricité du mix français, les panneaux solaires photovoltaïques font partie de ceux qui n'émettent pas de dioxyde de carbone (CO₂), avec le nucléaire, l'éolien et l'hydraulique. Cette technologie contribue donc à la baisse des émissions de CO₂ « instantanées » du réseau électrique français.

Il est important cependant de prendre en compte les émissions tout au long du cycle de vie des moyens de production et non pas seulement au moment de leur utilisation : là aussi, le solaire photovoltaïque est intéressant, avec une empreinte de 55 grammes en moyenne de CO₂eq par kWh produit, contre 82 grammes de CO₂eq par kWh pour le mix français en 2014, d'après l'ADEME.

Plus précisément, un panneau fabriqué en Chine installé au Nord de la France atteint les 80 gCO₂eq/kWh, contre 43 gCO₂eq/kWh pour un panneau fabriqué en Allemagne, dans la même situation.

Réduire les émissions de GES : Réseau ou photovoltaïque ?

Réseau électrique



82

grammes de CO₂eq par kWh

Solaire photovoltaïque



55

grammes de CO₂eq par kWh

Le contenu carbone du kWh du réseau varie en fonction de la saison et du moment de la journée, autour de la valeur moyenne de 82 gCO₂eq/kWh : les bénéfices du solaire photovoltaïque seront donc plus ou moins grands suivant l'heure d'usage de l'électricité produite.

Chiffres ADEME, 2015

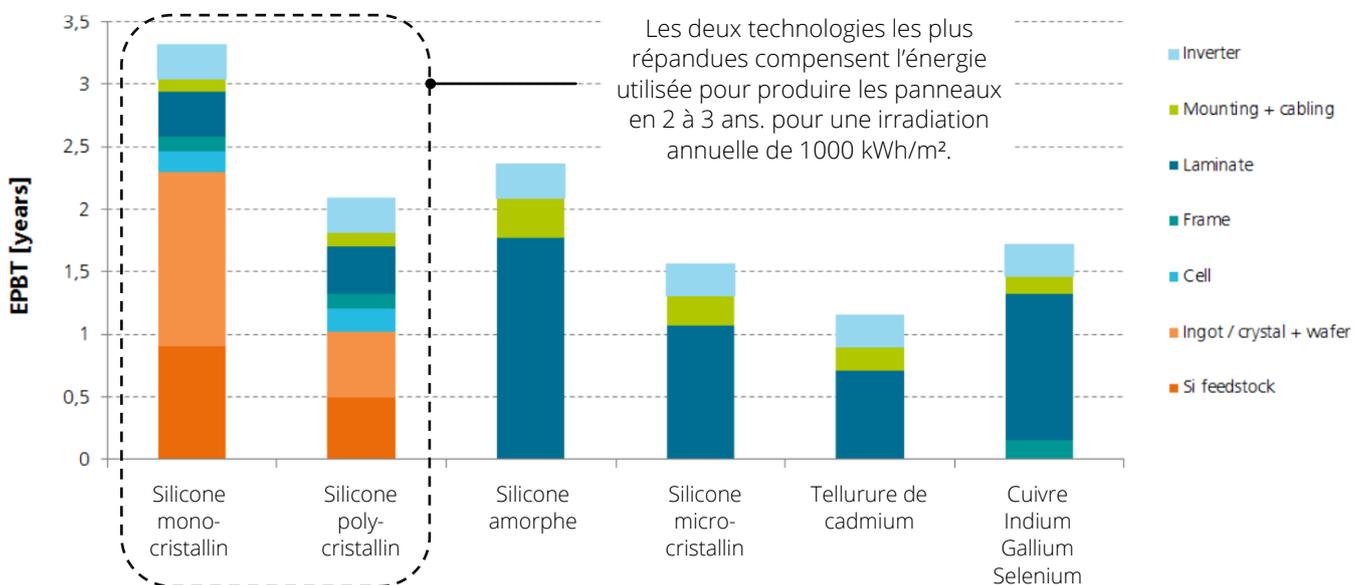
Temps de retour énergétique

Un autre indicateur intéressant pour évaluer les bénéfices environnementaux d'une technologie de production est son temps de retour énergétique : combien de temps faut-il aux panneaux pour produire autant d'énergie que celle consommée tout au long de son cycle de vie (fabrication, transport...)?

L'ADEME et Hespul avançaient en 2008 un temps de retour de 2.6 ans pour des panneaux installés en région parisienne. L'institut Fraunhofer avance en 2015 des temps de retour de l'ordre de 2 à 3 ans pour des panneaux construits et utilisés en Allemagne, suivant les technologies.

Temps de retour énergétique des différentes technologies de panneaux photovoltaïques

Photovoltaics report, Fraunhofer Institute, 2015



Economie du photovoltaïque

Rentabilité d'un système PV

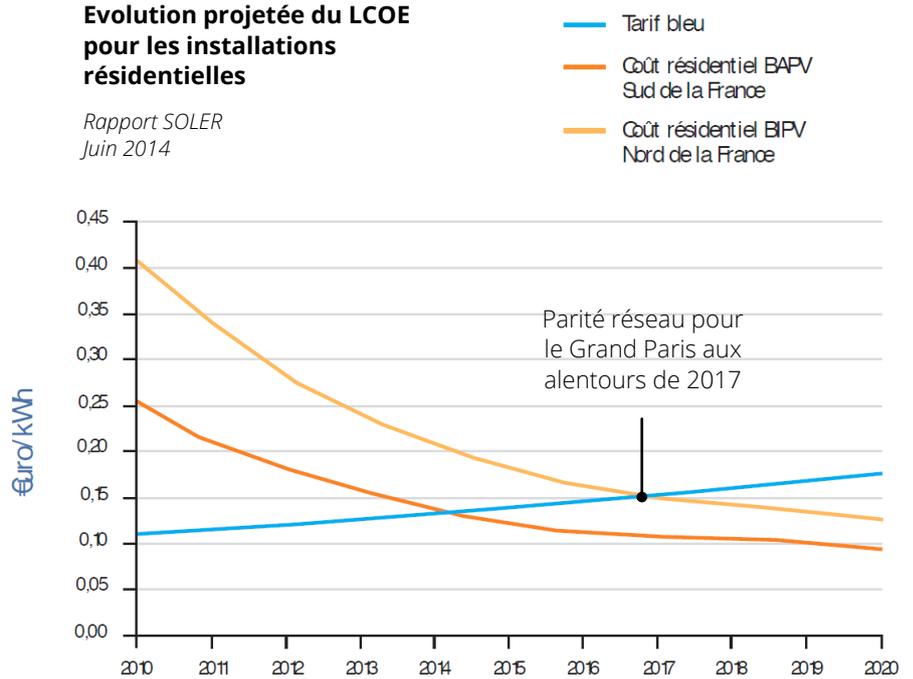
Pour étudier la faisabilité d'un projet photovoltaïque, on utilise la notion de LCOE (levelized cost of electricity), que l'on définit comme le coût, actualisé sur la durée de vie du produit, du kWh produit. Le LCOE prend en compte l'investissement initial, les coûts de maintenance et l'actualisation financière des flux monétaires. (voir p.26 pour plus de détails)

Depuis plusieurs années, le LCOE du photovoltaïque a fortement baissé et continue encore à diminuer du fait de la baisse continue des prix des panneaux, diminuant d'autant les coûts d'investissement. En parallèle, le prix de l'électricité du réseau augmente de manière continue depuis 2000 et devrait continuer à augmenter du fait des coûts croissants de production et d'exploitation du réseau français (la commission de régulation de l'énergie préconisait ainsi en 2012 une hausse de 30% en 5 ans).

La parité réseau se produira dans les années à venir : à partir de ce moment, le prix de l'énergie du réseau électrique public dépasse le LCOE d'un système photovoltaïque, qui devient ainsi intéressant financièrement, en dehors de toute considération sur le tarif de rachat. Toutes les régions françaises ne sont pas à égalité de ce point de vue : le Sud de la France a déjà atteint la parité par exemple, grâce à son fort ensoleillement (environ 1600 kWh/m².an à Nice contre 1100 kWh/m².an à Paris).

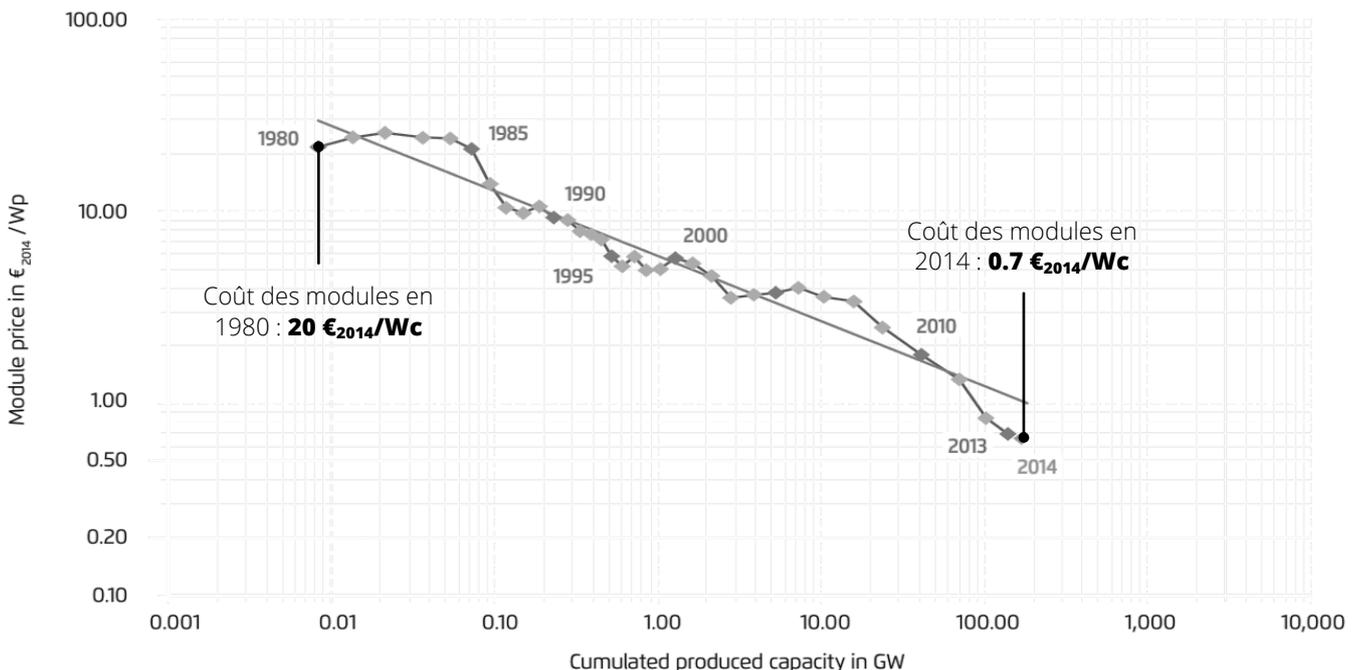
Evolution projetée du LCOE pour les installations résidentielles

Rapport SOLER
Juin 2014



Evolution des prix des modules PV, de 1980 à 2014, en €/Wc

Current and Future Cost of Photovoltaics, Fraunhofer Institute, 2015



Economie du photovoltaïque

Revente de la production

En France, en attendant la parité réseau, l'économie liée au solaire photovoltaïque est soutenue par la puissance publique. Cela se traduit par des aides financières de certaines régions et surtout par l'existence de tarifs de rachat garantis pendant une durée de 20 ans, ce qui constitue un incitatif à l'investissement. Les tarifs de rachat dépendent du type d'installation (intégration au bâti, intégration simplifiée au bâti ou autres).

Les installations intégrées au bâti permettent d'obtenir des tarifs de rachat plus avantageux, mais les coûts de matériel et d'installation sont aussi plus élevés.

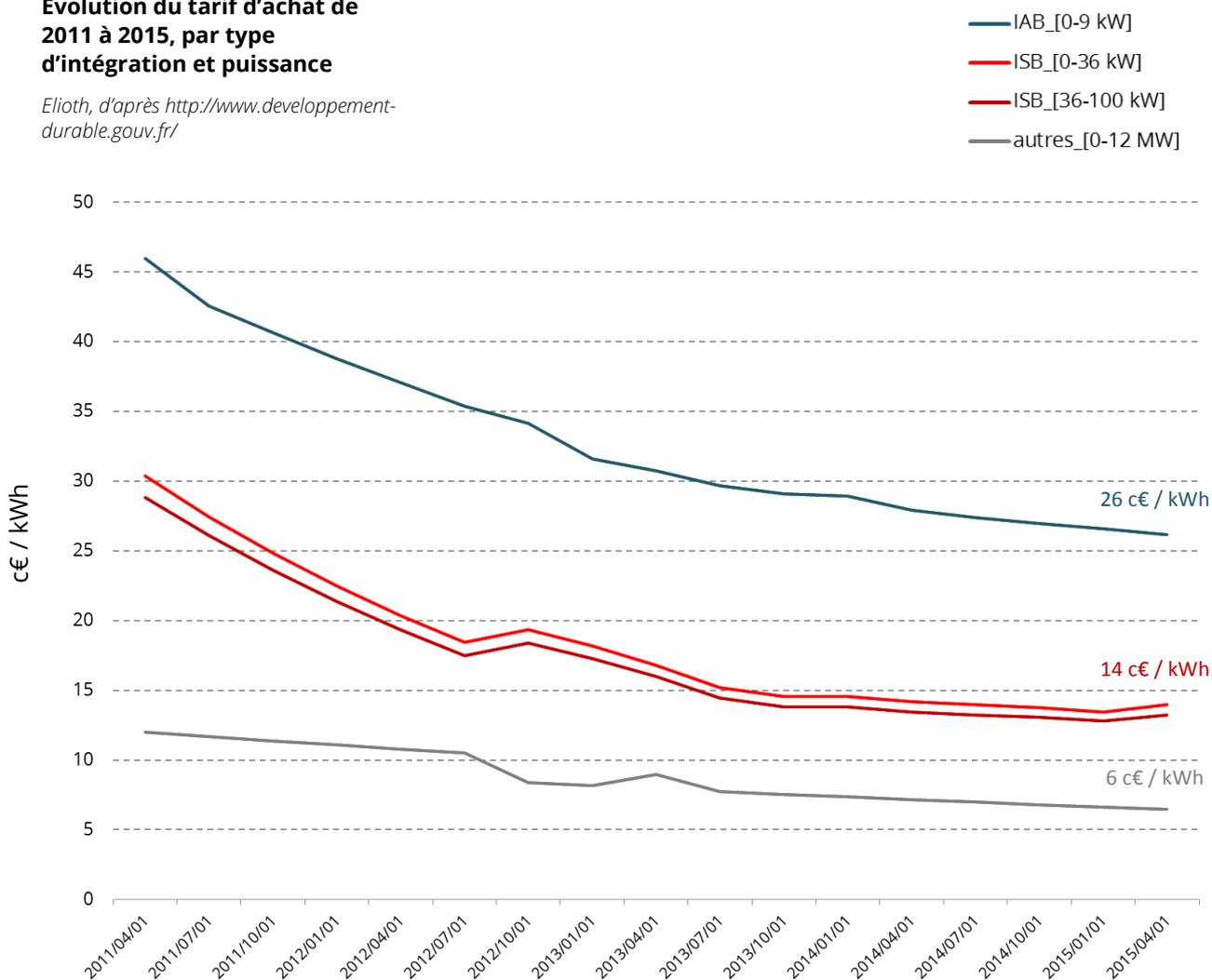
Les tarifs d'achat sont revus tous les trimestres, et évoluent en fonction du nombre de nouveaux projets soumis à approbation. Cela permet de réguler le nombre de projets déposés et donc la puissance supplémentaire installée sur le réseau.

Intégration Au Bâti (IAB) ou Intégration Simplifiée au Bâti (ISB) ?

	IAB	ISB
Position des panneaux	Toiture de bâtiments clos	Toiture de bâtiments
Orientation des panneaux	Dans le plan de la toiture	Parallèle au plan de la toiture
Étanchéité	Élément principal et nécessaire d'étanchéité de la toiture	Élément d'étanchéité de la toiture
Puissance	0 à 9 kWc	0 à 100 kWc

Evolution du tarif d'achat de 2011 à 2015, par type d'intégration et puissance

Elioth, d'après <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>



Production et consommation d'électricité

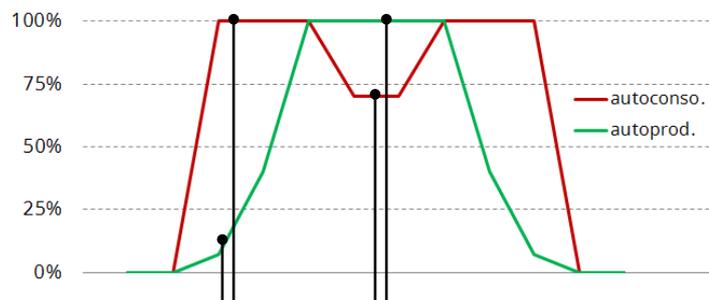
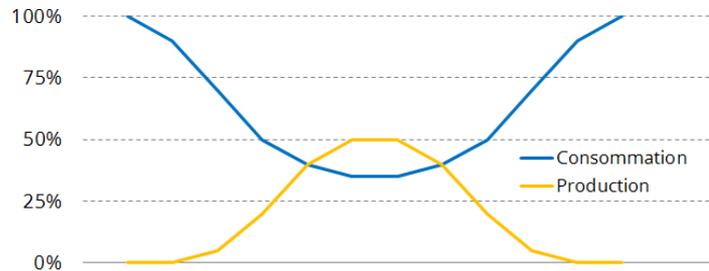
Autoconsommation et autoproduction

L'autoconsommation est définie par le fait que le producteur consomme lui-même l'énergie photovoltaïque produite ou bien encore répond au besoin de sites déterminés dans le voisinage de l'installation. L'autoproduction se définit elle par le fait que le consommateur produit lui-même l'énergie qu'il consomme.

Les exemples de profils annuels présentés ci contre illustrent la complémentarité de ces deux indicateurs : en mars, 7% de la consommation a été produite sur place (taux d'autoproduction), et 100% de la production a été consommée sur place (taux d'autoconsommation).

A l'inverse en juillet, le taux d'autoproduction atteint 100% et celui d'autoconsommation seulement 70%, reflétant le fait que l'énergie produite en surplus par rapport à la consommation est injectée sur le réseau.

Schémas de principe de l'autoconsommation et l'autoproduction



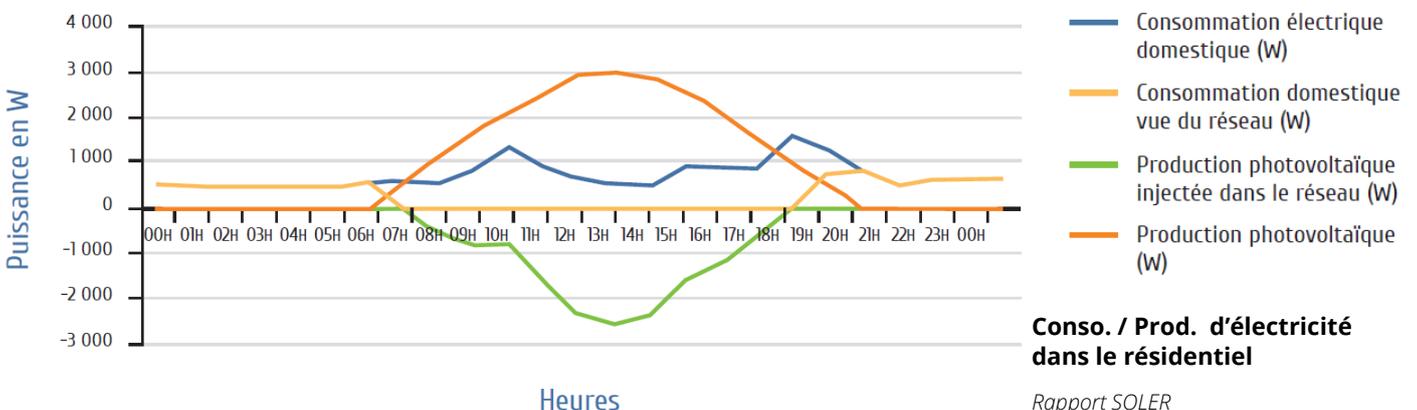
100% de la production est auto-consommée, mais le bâtiment importe toujours 90% de sa consommation !

A l'inverse, quand la production dépasse la consommation, le taux d'autoproduction passe à 100% : le bâtiment est alors « énergie positive »

Extension à l'échelle urbaine

L'autoconsommation à l'échelle d'un « îlot urbain » peut permettre de lisser les consommations, et de faire coïncider production et consommation. Cependant une telle installation nécessite l'étude des consommations individuelles pour éviter de soutirer ou bien de réinjecter une puissance trop importante au réseau.

Parallèlement à la mise en place de systèmes de production d'énergies renouvelables, il faut compter sur la sensibilisation et l'éducation des utilisateurs, pour obtenir une meilleure répartition des usages énergétiques.



Conso. / Prod. d'électricité dans le résidentiel

Rapport SOLER
Juin 2014

Stockage d'électricité

Stockage sous forme électrochimique

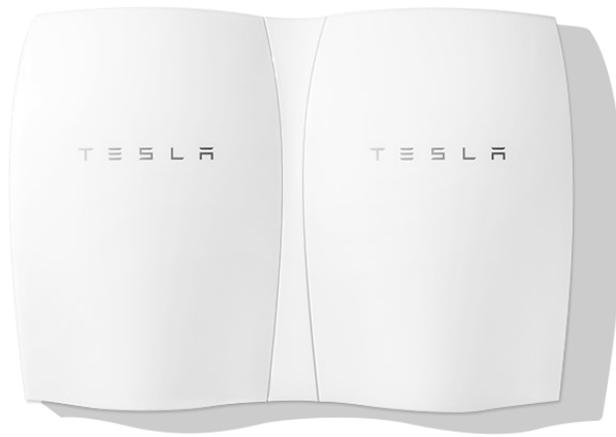
Le stockage d'électricité est une technologie clé pour les systèmes de production d'énergie dite renouvelable. Il existe plusieurs types de technologies, mais chacune correspond à des applications particulières.

Les batteries sont la technologie la plus appropriée pour le stockage d'électricité des systèmes photovoltaïques résidentiels et de taille réduite.

Aujourd'hui, les prix restent importants pour une diffusion de masse. Cependant, ils pourraient devenir compétitifs à l'avenir, notamment dans le contexte de la fin des tarifs réglementés pour l'électricité. Celle-ci doit prendre en effet pour les gros consommateurs à partir du 31 décembre 2015.

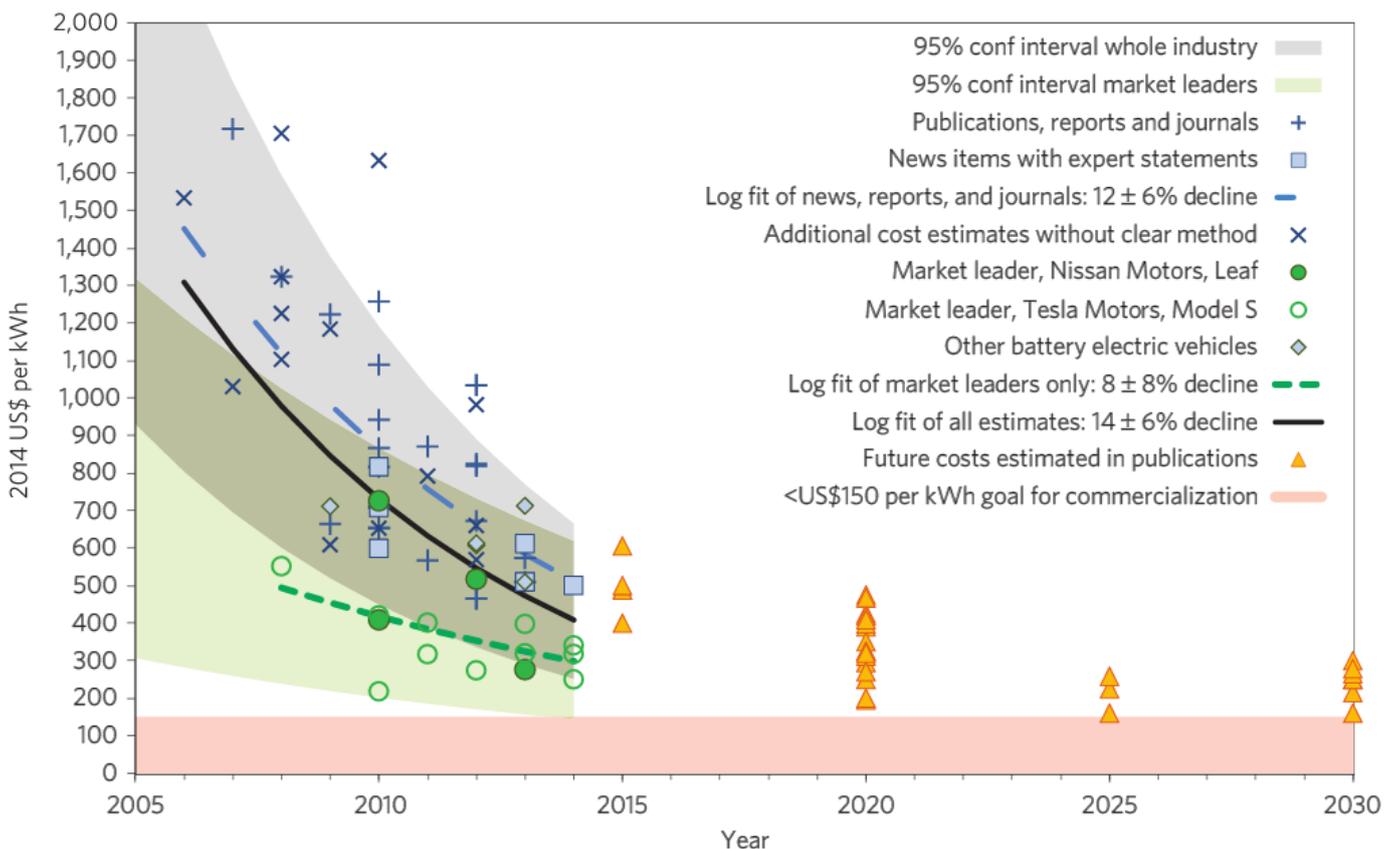
Tesla a récemment annoncé la mise sur le marché d'un nouveau produit, à destination des particuliers, particulièrement compétitif en terme de prix par kWh de stockage fourni : 350 \$/kWh, dans un marché situé aux alentours des 500 \$/kWh.

Batteries PowerWall de Tesla



Evolution passée et estimation du prix des batteries électriques de 2005 à 2030

Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles
Nykqvist, Nilsson - Nature, 2015



Stockage d'électricité

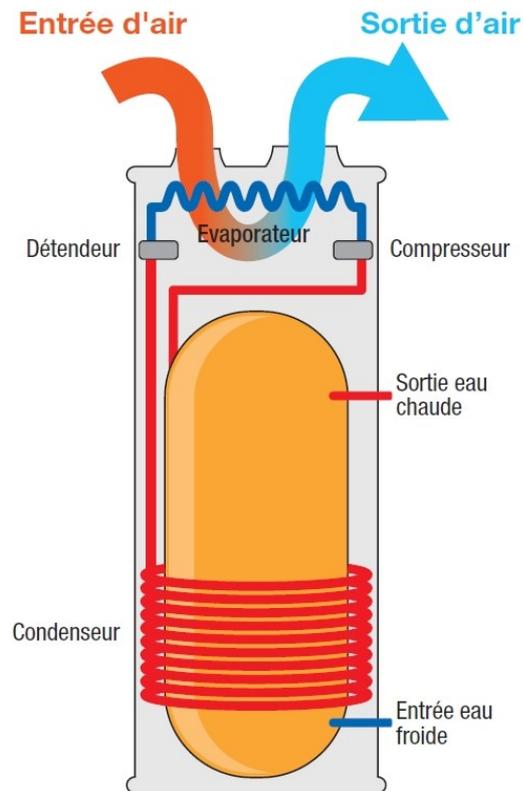
Stockage sous forme de chaleur

L'électricité produite peut aussi être transformée en chaleur pour être stockée, de manière non réversible (sans possibilité de recréer de l'électricité à partir de l'énergie stockée). Les ballons d'eau chaude sanitaire thermodynamiques permettent cette conversion, avec plusieurs avantages :

Du fait du fonctionnement en pompe à chaleur, chaque kWh électrique solaire est converti en moyenne en 3 kWh thermiques stockés dans l'eau.

Ce type de stockage permet également de maximiser l'autoconsommation de l'électricité solaire produite. Au lieu d'injecter l'énergie sur le réseau lorsque la production dépasse la consommation, ce qui dégrade le taux d'autoconsommation, l'énergie est stockée pour être utilisée plus tard : le taux d'autoconsommation instantané restera à 100%, et le taux d'autoproduction futur augmentera.

Schéma de principe du ballon d'ECS thermodynamique



Autres types de stockage

Les technologies de stockage de l'énergie électrique sont nombreuses et se caractérisent principalement par la forme de l'énergie stockée (mécanique, électrochimique, thermique...), le temps de stockage (secondes, heures, jours...) et le rendement (énergie restituée/énergie stockée) : hydraulique gravitaire, air comprimé, hydrogène...



Panneaux solaires thermiques

Tubes sous vide
Crédits photos Viessmann

Technologies solaires Thermique

Les systèmes solaires thermiques permettent de produire de la chaleur, le vecteur pouvant être l'eau ou l'air. Il passe dans les tuyaux du panneau et est chauffé directement par le rayonnement solaire.

Les températures atteintes en sortie du système (de l'ordre de 100 à 150°C) permettent de l'utiliser pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire (ECS), et parfois de le combiner avec le chauffage des locaux. On parle alors de système solaire combiné (SSC).

Il existe plusieurs types de panneaux solaires thermiques : les panneaux plans vitrés, les tubes sous vide, et les capteurs solaires à concentration. Si les deux premiers sont intéressants pour être intégrés sur toit, mais les capteurs solaires à concentration ne sont pas adaptés, car ils sont très volumineux, ne sont pas plans. Ils nécessitent en outre un rayonnement solaire direct important (la région parisienne n'est donc pas adaptée).

Le système nécessite la mise en place d'une boucle d'eau chaude. L'entretien de cette boucle est nécessaire, pour éviter des baisses importantes de rendement, ou simplement la dégradation du système.

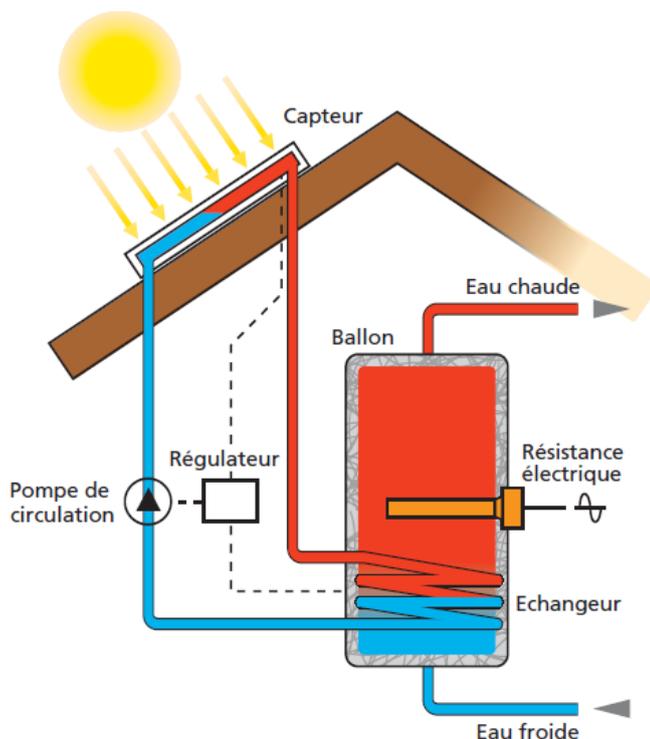


Schéma de principe d'un système de production d'ECS à l'aide de solaire thermique

EDF, L'énergie solaire thermique, 2006

Efficacité de conversion du gisement solaire

Les rendements dépendent des conditions météorologiques extérieures, de la température, de l'ensoleillement, mais aussi du vent.

L'efficacité de l'installation est la quantité de chaleur issue du rayonnement solaire incident transmise au fluide caloporteur. Comme le graphique ci contre le montre, une partie de l'énergie est d'abord perdue par réflexion et absorption, puis perdue en fonction de l'écart de température entre le fluide et la température de l'air extérieur.

Le rendement sera d'autant plus élevé que le rayonnement solaire sera important et que cet écart de température sera faible.

Inclinaison des panneaux

L'inclinaison optimale des panneaux dépend de l'équilibre entre production et consommation de chaleur, ainsi que de la capacité de stockage : une inclinaison à 30° environ maximise l'énergie incidente annuelle vue par les panneaux, mais une inclinaison de 40 à 50° permettra de maximiser la production d'hiver, lorsque le besoin de chaleur est le plus important et le soleil le plus bas à l'horizon.

Des panneaux inclinés à 30° auraient donc tendance à ne pas produire assez en hiver, et trop en été, la chaleur ne pouvant être valorisée qu'en étant consommée sur place.

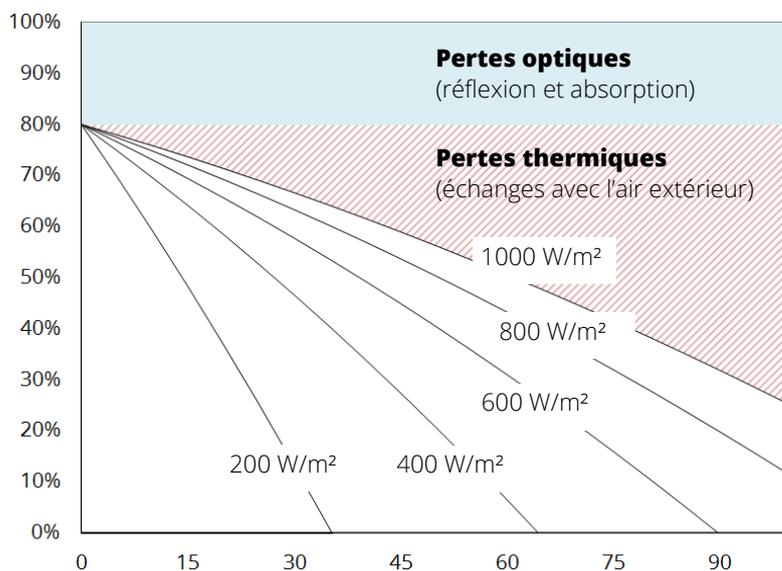
Communautés solaires

Il existe des « communautés solaires », où l'énergie solaire thermique est mutualisée pour rendre les systèmes optimaux. Cependant, de telles communautés, comme celle de Drake Landing (cf. figure ci-contre) au Canada, sont situées en dehors des grandes villes, car les structures permettant de mutualiser et de stocker l'énergie thermique sont très imposantes.

Communauté solaire de Drake Landing, Okotoks, Canada

Evolution de l'efficacité d'un capteur thermique (%) en fonction de la différence de température avec l'extérieur (°C) et du rayonnement solaire incident (W/m²)

Elioth, 2015



Economie du solaire thermique

Rentabilité d'un système thermique

Comme pour l'électricité, on détermine le coût de production du kWh, ou LCOE, en analysant l'ensemble des coûts sur la durée de vie du système, ainsi que l'énergie produite sur cette même durée de vie. Ce calcul tient aussi compte des éventuelles aides à l'investissement.

Dans le cas du solaire thermique, les aides à l'investissement dépendent des régions. De plus, le crédit d'impôt transition énergétique (CITE) permet de subventionner en partie le prix des installations, sous réserve de certaines conditions.

Dans le cas d'un chauffe-eau solaire, le prix du kWh doit être comparé avec le prix du kWh produit avec les moyens conventionnels de chauffage de l'eau : l'électricité (15 c€/kWh), le gaz naturel (9 c€/kWh) ou encore le fioul (7 c€/kWh), en 2014. Ces trois sources d'énergie ont des prix qui augmentent depuis 2000, avec parfois de fortes variations dans le cas des énergies fossiles.

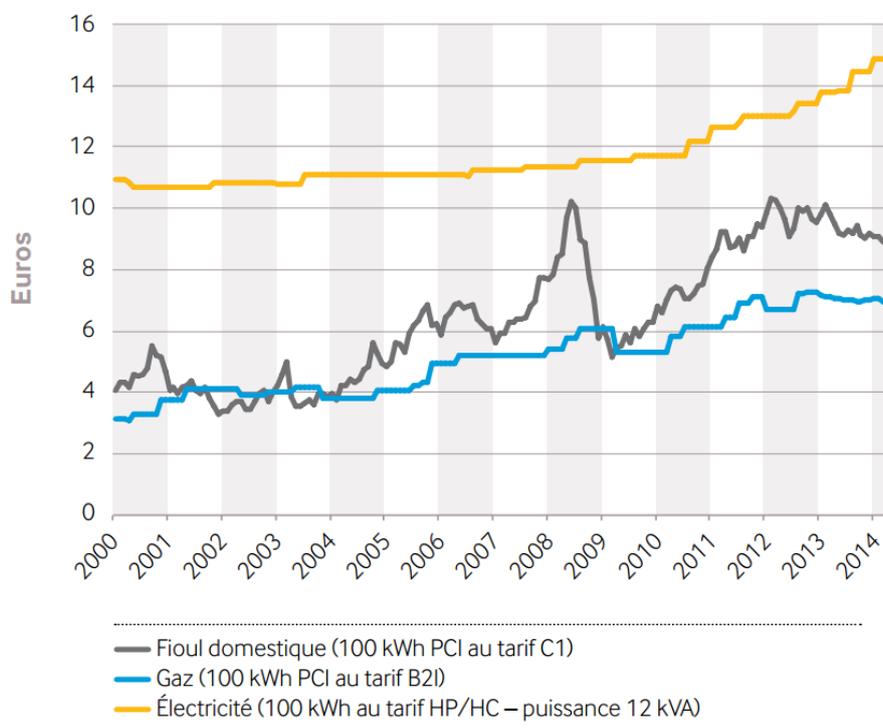
Le prix d'une installation dépend du type de capteurs utilisés, du type d'utilisation envisagée, et aussi de sa taille. Les systèmes SSC sont par exemple plus coûteux que les systèmes CES. De plus, les capteurs à tubes sous vide sont plus chers que les capteurs plans vitrés, car leur fabrication est plus complexe.

Enfin, plus la surface installée est importante, plus les prix sont bas, et donc plus l'installation est rentable. Cela s'explique notamment par la mutualisation des équipements tels que les ballons de stockage, ou encore les raccords à effectuer. (voir graphe ci-contre.)

Par exemple, dans le cas d'un système de 4m² de panneaux thermiques plans, on atteint un coût de 20 c€/kWh utile produit, à Paris (Méthode TEC, 1300€/m², 3% d'actualisation).

Evolution des prix du kWh électrique, gaz et fioul, de 2000 à 2014

Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France, RTE, 2014



Source : Base de données Pegase – SOeS

Production, consommation et stockage

Equilibre production / consommation

Contrairement au cas de l'électricité, l'eau chaude produite ne peut pas être injectée dans un réseau qui servirait de tampon. Il faut donc nécessairement inclure un système de stockage thermique.

Celui-ci peut être de différente taille, suivant le déphasage attendu entre production et consommation. La fraction solaire du système entier repose sur son bon dimensionnement.

Pour la consommation d'eau chaude sanitaire, le profil d'utilisation est journalier. Le profil diffère aussi suivant le type de bâtiment, résidentiel ou tertiaire. Dans le résidentiel, on observe des pics d'utilisation le matin et le soir, lors des périodes de présence des habitants.

Une autre possibilité d'utilisation de l'énergie thermique est le chauffage des bâtiments, avec un système dit

« combiné » : le profil du besoin est alors additionné entre besoins d'ECS et besoins de chauffage.

Surchauffe estivale

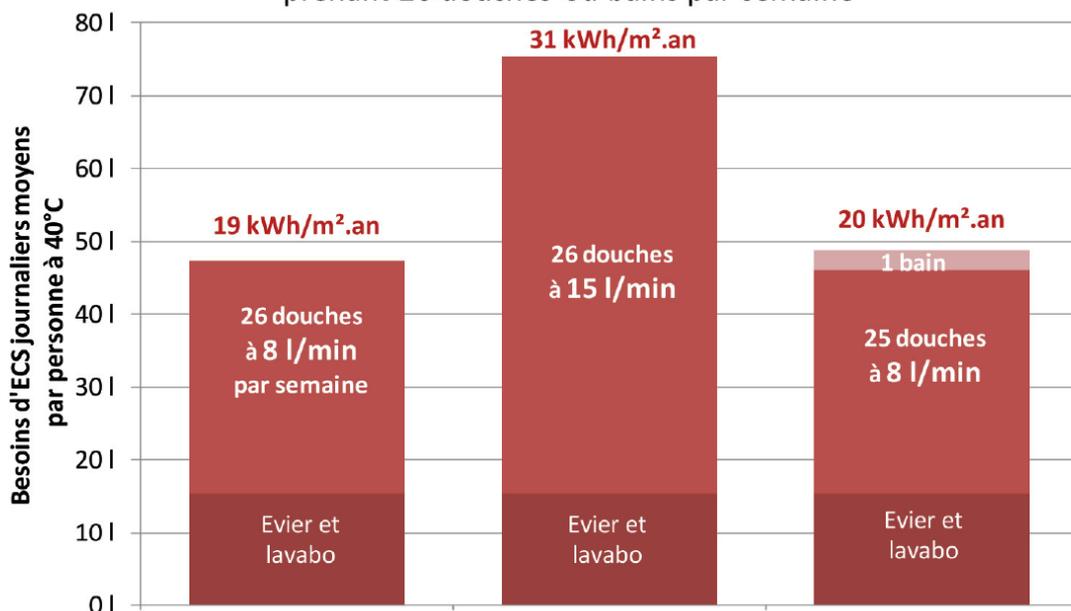
La question de l'équilibre est importante du point de vue de l'autoconsommation, mais aussi parce que les installations solaires thermiques présentent des risques de surchauffe si elles ne disposent pas d'un exutoire pour le surplus de production.

Ce problème est d'autant plus important qu'il intervient au moment de production de chaleur maximale et de consommation minimale, l'été (absences des occupants, forte chaleurs diminuant les besoins de chaleur...).

Plusieurs solutions existent pour pallier à cette difficulté : vidange automatique du fluide des panneaux, refroidissement nocturne, décharge des capteurs dans un échangeur placé dans la terre...

Un dimensionnement maximisant le rendement d'hiver (avec une inclinaison plus forte) aura également tendance à diminuer le phénomène. Une solution « passive » existe également : profiter de protections solaires dimensionnées pour masquer les panneaux pendant l'été.

Besoins d'ECS d'une famille de 4 personnes prenant 26 douches ou bains par semaine



Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012

Installations d'eau chaude sanitaire, 2014



Panneaux solaires, San Francisco
 Tubes sous vide et PV mono-cristallin
 Crédits photos Solar Radiant Solution

Technologies solaires

Comparaisons photovoltaïque / thermique

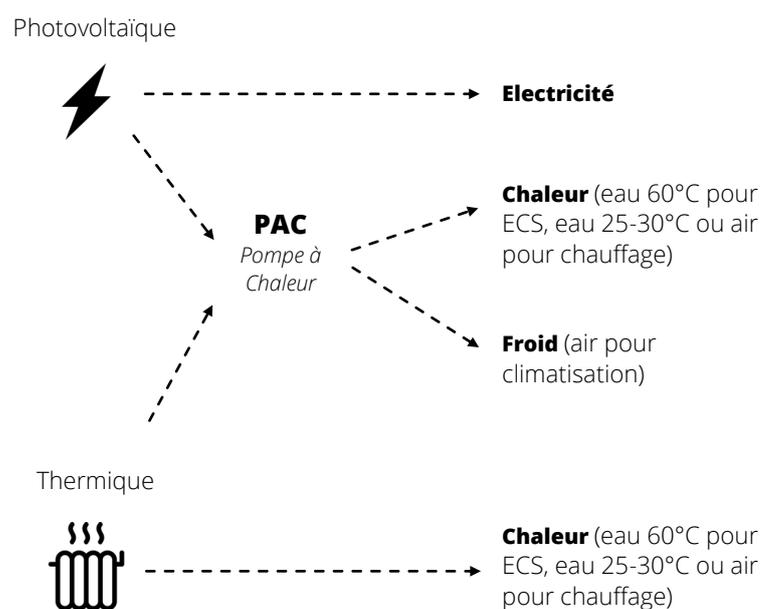
Electricité ou chaleur ?

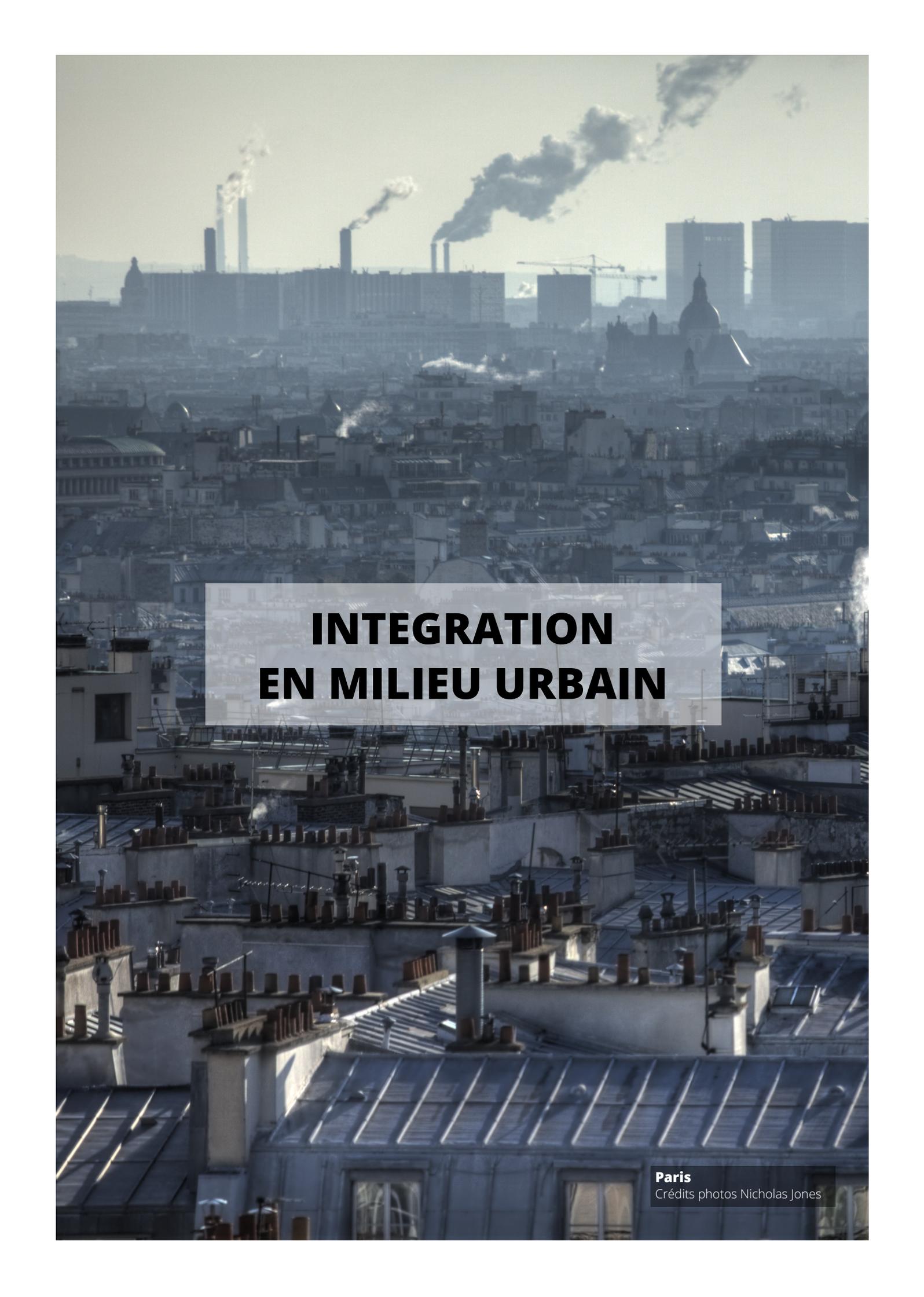
L'énergie finale produite par les panneaux solaires photovoltaïques et thermiques peut être différente. Dans un cas, il s'agit d'électricité, dans l'autre de chaleur.

À noter que les modules photovoltaïques peuvent aussi fournir de la chaleur comme énergie finale, à condition qu'ils soient couplés à un autre système, soit une résistance thermique (bien que ce soit très inefficace thermodynamiquement), soit une pompe à chaleur. Le schéma ci-contre permet de résumer ces considérations..

Différents modes de conversion de l'énergie solaire

Elioth, 2015



An aerial photograph of Paris, France, showing a dense urban landscape of rooftops with numerous chimneys and skylights. In the background, several industrial smokestacks are visible, emitting thick plumes of white smoke that rise into the sky. The city's architecture is a mix of traditional European buildings and modern structures. The overall scene is captured in a slightly hazy, atmospheric light, possibly during dawn or dusk.

INTEGRATION EN MILIEU URBAIN

Paris
Crédits photos Nicholas Jones



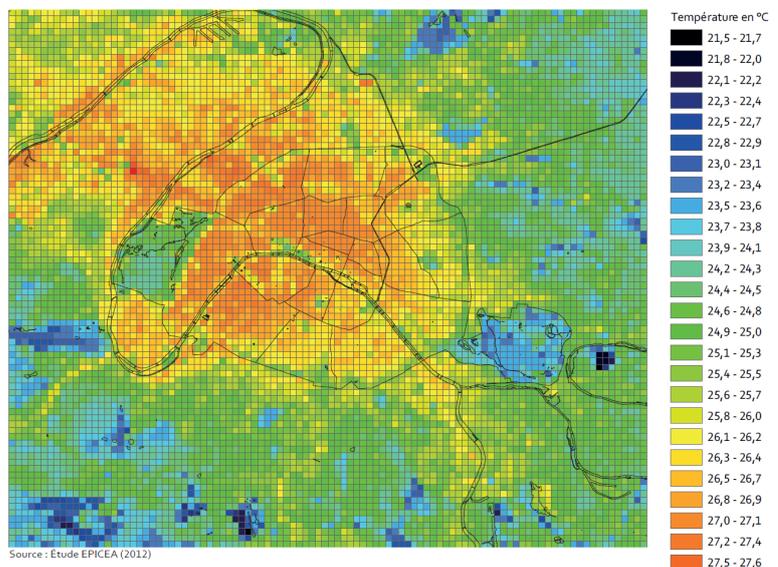
Intégration en milieu urbain

Effet sur les îlots de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain (ICU)

La notion d'îlot de chaleur fait référence à l'augmentation de la température due à l'urbanisation : les villes sont plus chaudes que leurs environs moins denses. Les consommations d'énergie en chauffage sont diminuées, mais les consommations pour la climatisation augmentent et le confort thermique en été se dégrade.

Un des paramètres importants de ce phénomène souvent mis en avant est l'albedo des matériaux de l'espace urbain, c'est-à-dire la proportion de rayonnement réfléchi. Les toits en zinc du centre historique réfléchissent environ 60% du rayonnement et chauffent moins que les toits en tuile, qui en réfléchissent environ 20%.



APUR : Les îlots de chaleur urbains à Paris, Cahier #1

Impact des panneaux solaires

Les capteurs solaires ayant un albedo d'environ 10%, leur mise en place à grande échelle sur les toits parisiens a une influence sur la balance énergétique de la ville, mais pas dans le sens attendu par un raisonnement sur l'albedo seul. D'après une étude de Météo-France et du CSTB, un équipement de 20% des toitures inclinées et 50% des toitures plates aurait abaissé la température de l'air pendant l'été 2003 de 0.2°C en journée, et de 0.3°C la nuit.

Ce résultat s'explique par la modification de la surface de contact ville - atmosphère ainsi que les masques créés par les panneaux, qui altèrent les échanges thermiques entre le bâti et l'air.

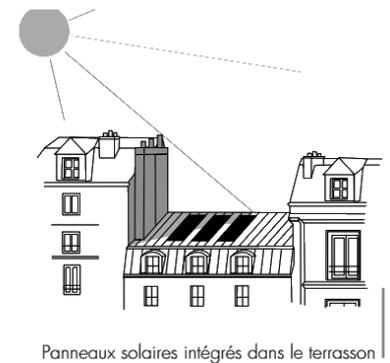
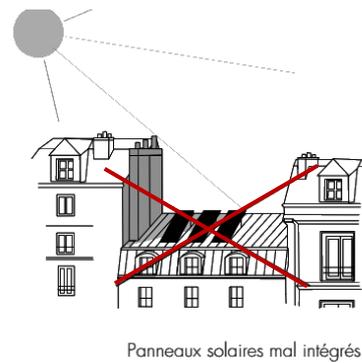
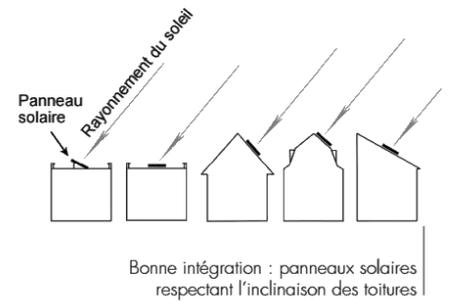
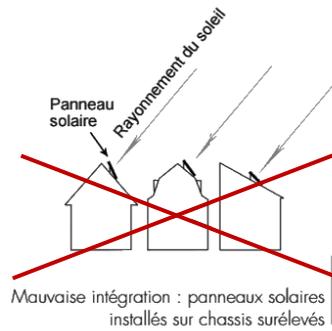
Ce changement de comportement intervient même la nuit alors que l'on attendrait instinctivement un effet nul des panneaux, vu l'absence de rayonnement solaire, du fait des effets inertiels et d'un volume d'air d'échange actif au dessus

de la ville réduit pendant la nuit (ce qui amplifie les effets des échanges thermiques).

Réglementation

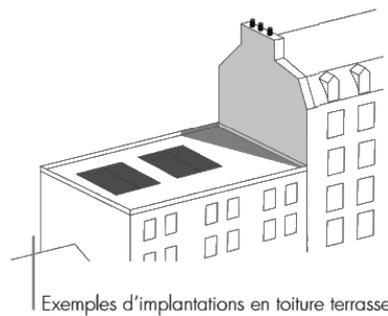
Comme l'expose le document Habiter Durable - Panneaux Solaires de la Mairie de Paris, l'intégration de panneaux solaires sur les toitures parisiennes est soumise à réglementation, notamment celle du PLU de la ville de Paris : sur les toits terrasses, la pente des capteurs peut être optimisée, par contre, sur tous les autres types de toitures, la pente du panneau doit suivre celle du toit et les panneaux ne peuvent pas être surélevés.

L'autorisation d'installation de panneaux solaires peut être refusée si « l'installation, par sa situation, son volume, son aspect, son rythme ou sa coloration est de nature à porter atteinte au caractère ou à l'intérêt des lieux avoisnants, aux sites, aux paysages, ainsi qu'à la conservation des perspectives monumentales ». En plus des considérations de rendement lorsqu'un système solaire ou thermique, il convient donc d'étudier son intégration architecturale dans son environnement.



Préconisations d'intégration des panneaux solaires aux toitures, à Paris

Habiter Durable - Panneaux Solaires, Mairie de Paris, 2014



Les toits parisiens, futur patrimoine mondial de l'UNESCO ?
Crédits photos AFP

Masques

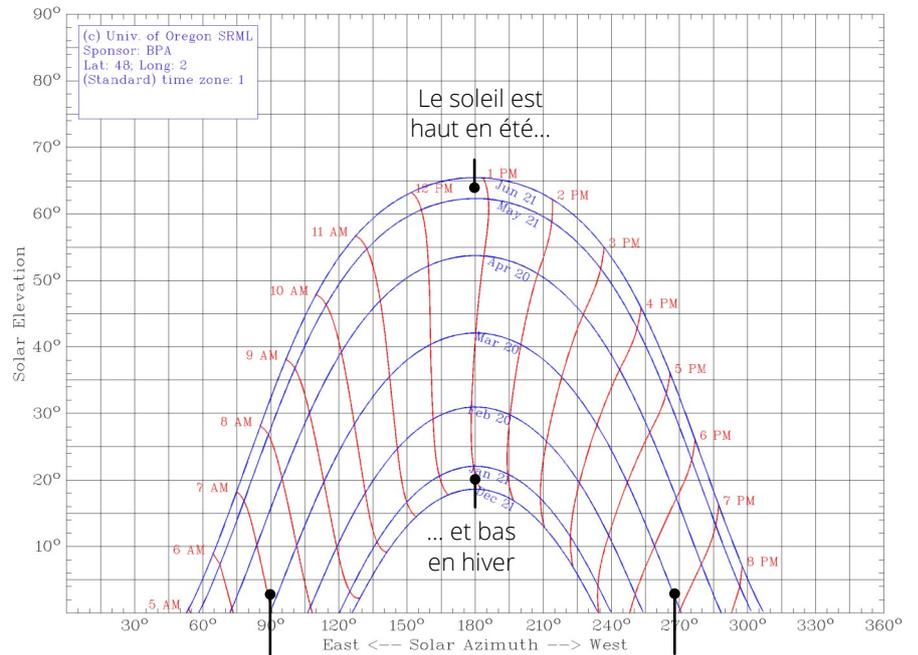
La performance des panneaux solaires est soumise à l'ensoleillement. Celui-ci fluctue de manière naturelle, au cours de l'année et au fur et à mesure de la journée, mais on peut aussi noter l'influence des masques partiels, qui peuvent provenir de tous les bâtiments, arbres ou obstacles qui entourent le champ des panneaux.

En été, le soleil est haut dans le ciel, formant un angle d'environ 60° en milieu de journée avec l'horizon : du point de vue du panneau, un masque situé à 20 mètres dans la direction du soleil devrait faire 42 mètres de haut pour cacher le soleil. En hiver, avec un soleil à 20°, un masque de 7 mètres suffirait à le cacher dans la même configuration.

A Paris, notamment en haut des immeubles, les masques potentiels sont nombreux (lucarnes, cheminées, immeubles voisins...). Il est donc nécessaire de faire l'étude des masques partiels avant l'implantation, car ils peuvent entraîner une perte d'énergie importante.

Diagramme solaire Elevation - Azimuth à Paris

University of Oregon, Solar Radiation Monitoring Laboratory



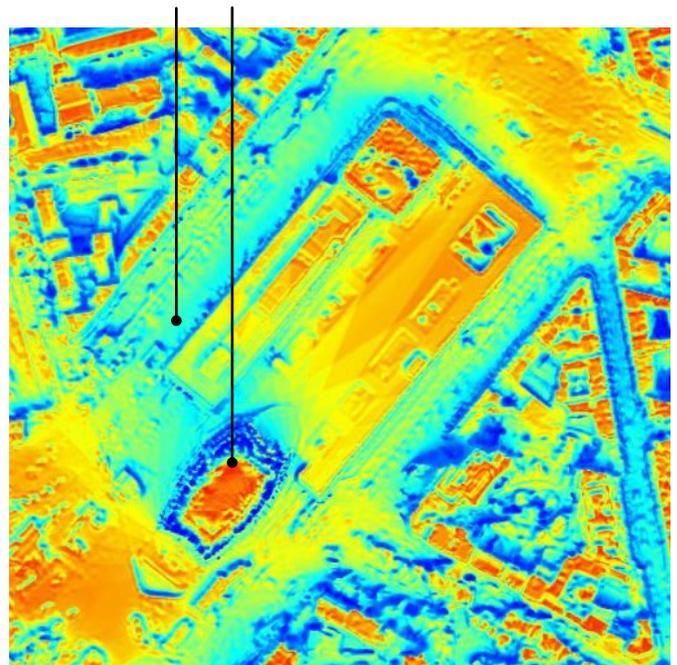
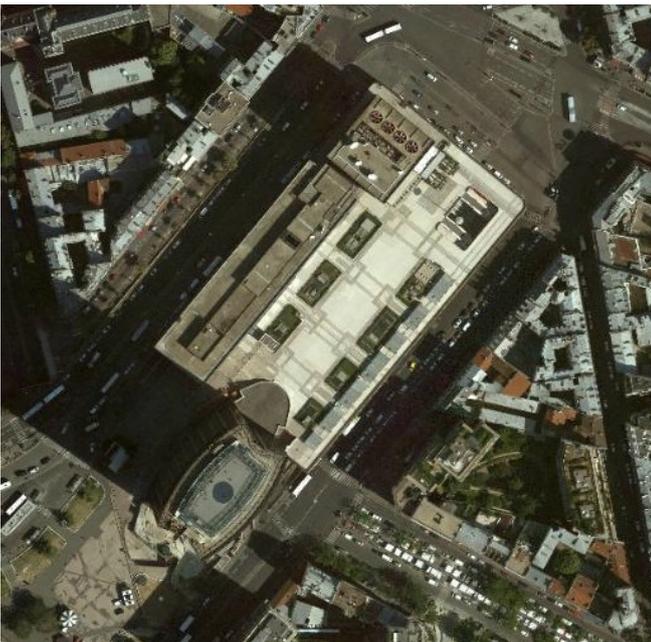
Le soleil se lève à l'Est...

... et se couche à l'Ouest

Effet des masques sur le rayonnement solaire autour de la tour Montparnasse

Cadastre solaire de la ville de Paris, APUR

Le gisement solaire annuel des surfaces voisines, au Nord de la tour, est environ deux fois plus faible que celui au sommet de la tour



Végétalisation

La végétalisation du bâti parisien s'est enclenchée dans le but de favoriser la biodiversité en ville, mais aussi de profiter des vertus environnementales des plantes pour améliorer le cadre de vie, atténuer les effets d'îlots de chaleur...

La ville de Paris comporte aujourd'hui 5.6 hectares de toitures vertes, et compte atteindre les 100 hectares d'ici 2020. L'étude de l'APUR sur le potentiel de végétalisation des toitures terrasses à Paris identifie 460 ha de surfaces mobilisables : le conflit d'usage ne devrait donc pas être un problème pour l'instant, avec une surface de panneaux installée fin 2014 de 3.2 ha.

Un toit peut en outre supporter à la fois une toiture végétalisée et des panneaux solaires. La végétalisation peut également se faire sur d'autres surfaces, avec l'exemple des murs végétalisés.

Un conflit d'usage peut cependant émerger dans le cas où la végétation vient masquer les panneaux, avec des arbres plus hauts que les toitures par exemple. (ce qui est fréquent dans l'habitat pavillonnaire mais beaucoup moins en milieu urbain dense).



Mur végétal, rue d'Aboukir, Paris

Un pignon végétalisé pour un immeuble d'habitation, Tendances & Habitat



Panneaux solaires photovoltaïques mono-cristallins sur une toiture végétalisée, à Londres

GreenRoofers



Résultats de l'étude typologique

Halles Pajol, Paris
Crédits photos Pascal Poggi

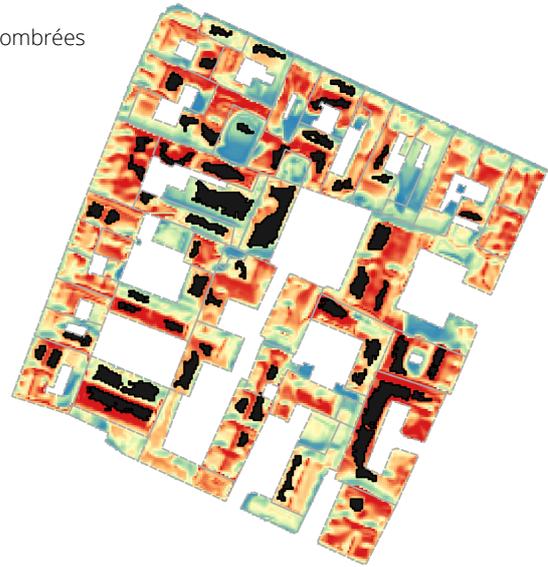
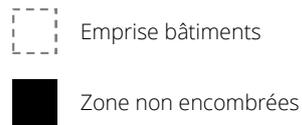
Méthode d'étude de potentiel photovoltaïque

Outils : QGIS, R, solaR

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.

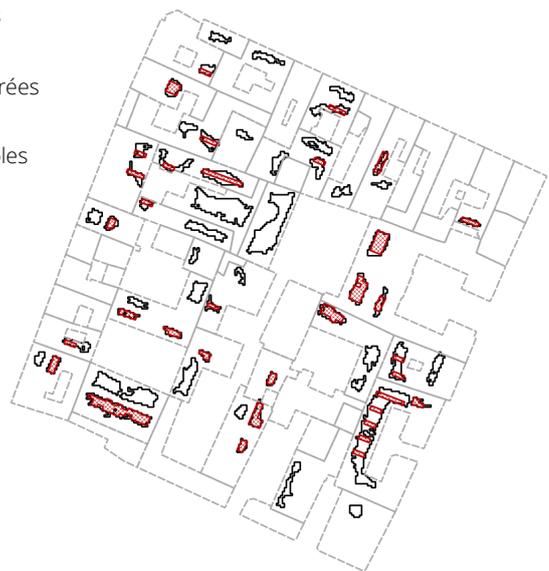
Lorsque celle-ci est envisagée, les obstacles passent progressivement en dessous des systèmes, qui tendent alors vers le cas idéal d'installation sur une toiture non obstruée dont nous connaissons les performances. L'approche permet donc de quantifier ces deux extrêmes.



2 / Filtrage et régularisation des zones d'implantation

Etant 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.

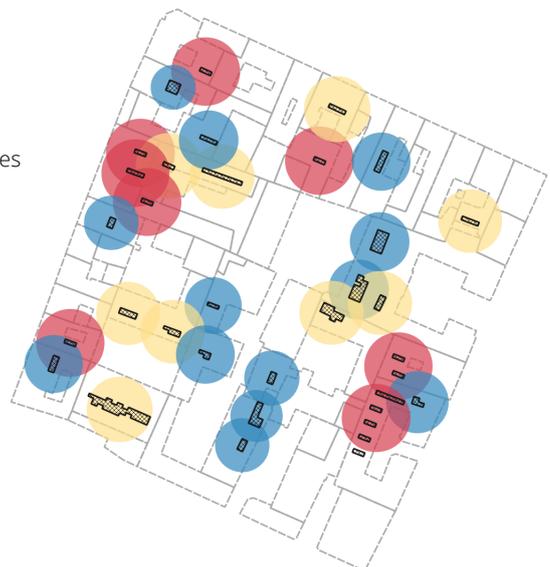
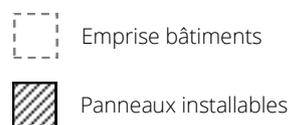
On obtient ainsi le positionnement optimal de panneaux rectangulaires de 1x1.5m, qui maximise la surface de panneaux en s'adaptant à la forme du toit tout en gardant une implantation compacte. Les systèmes sont filtrés pour ne retenir que ceux qui disposent d'un gisement solaire annuel de plus de 800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



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.



Gisement solaire du Grand Paris

Source : Météonorm, Paris - Montsouris

Calculs d'irradiation : solaR

L'irradiation globale annuelle sur un plan horizontal à Paris place la ville en milieu de classement du gisement des capitales européennes : derrière Madrid et Rome (-30 % environ), mais devant Londres et Berlin (+10 % environ)¹.

Les simulations d'irradiation reçue par un plan incliné de 30° montrent une orientation privilégiée sud-ouest pour les toitures en pente, avec une irradiation moyenne journalière supérieure à 3 kWh/m².

¹ PVGIS © European Communities 2001-2012

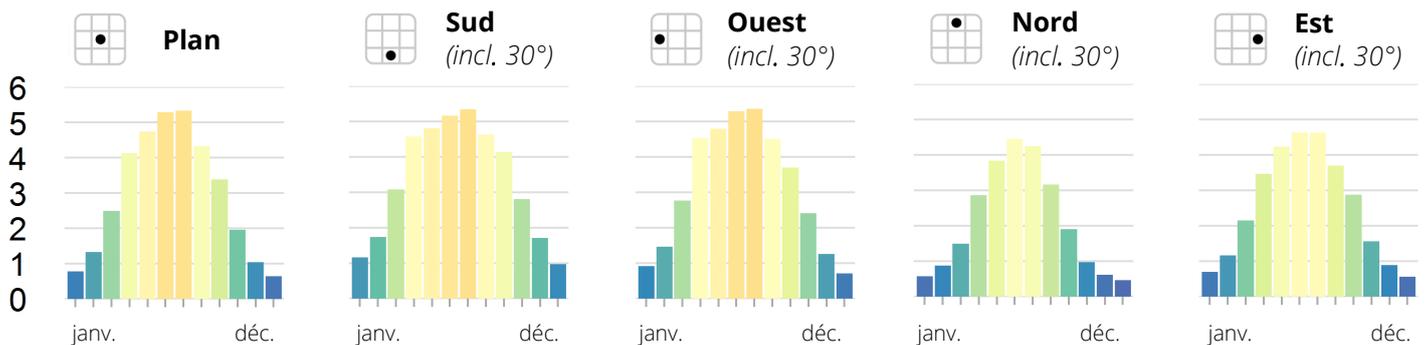
Irradiation globale journalière moyenne

kWh/m²

	Plan	Sud (incl. 30°)	Ouest (incl. 30°)	Nord (incl. 30°)	Est (incl. 30°)
Min.	0.1	1.4	0.1	0.1	0.1
Moyenne	3	3.4	3.1	2.1	2.6
Max.	8.2	8.2	8.6	6.4	6.7
Somme annuelle	1080	1220	1150	780	930

Irradiation globale journalière moyenne par mois, de janvier à décembre

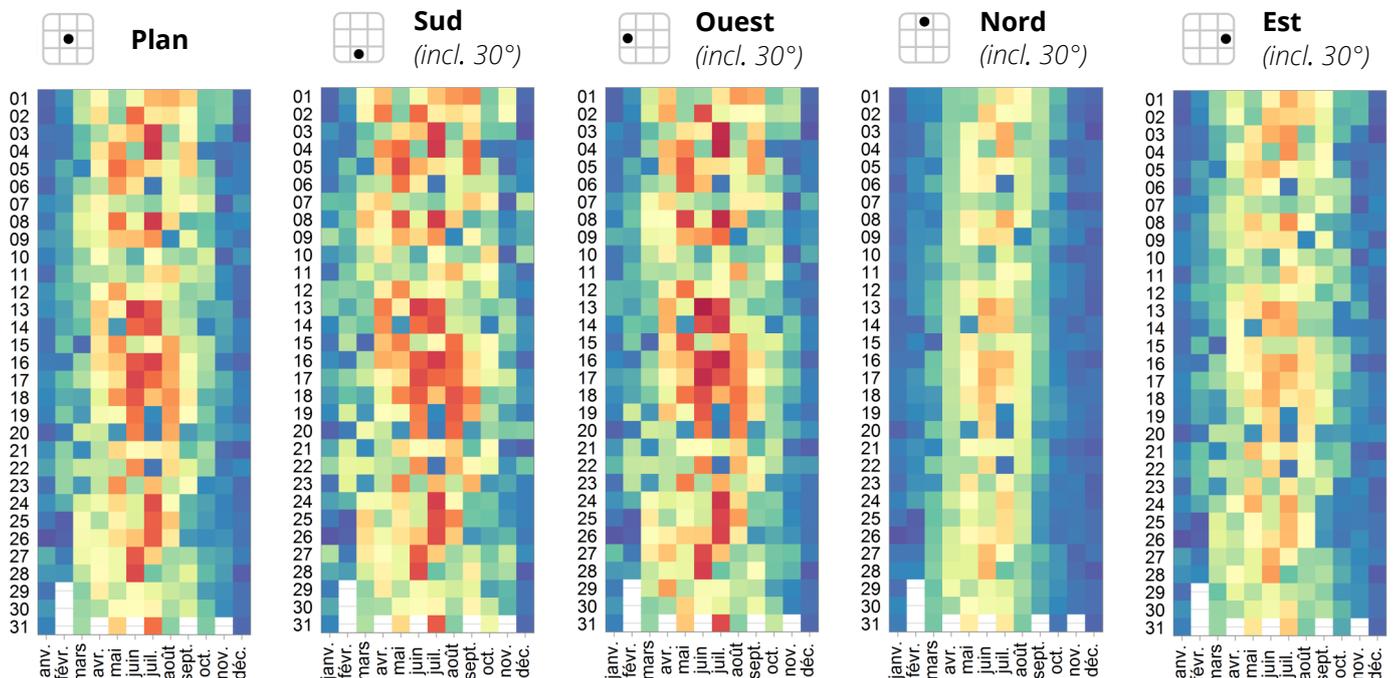
kWh/m²



Irradiation globale journalière par jour et par mois, de janvier à décembre

kWh/m²

0 à 9 kWh/m²



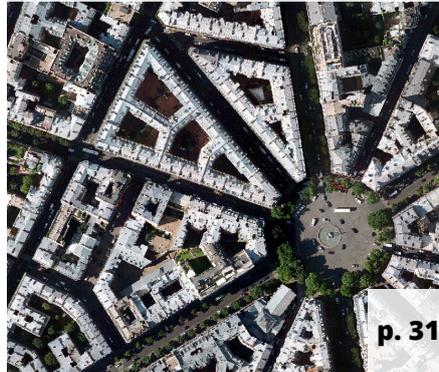
Typologies étudiées

Les 8 typologies étudiées

Du fait de ses époques de construction et de ses styles architecturaux très divers, le Grand Paris possède des typologies de toitures variées : toits « à la Mansard » des quartiers haussmanniens, toits terrasses des immeubles plus récents, toits à la française des quartiers pavillonnaires... Elles constituent autant de contraintes différentes et donc d'opportunités variables pour le captage de l'énergie solaire pour la production d'électricité et de chaleur en milieu urbain.

Haussmannien

Place Victor Hugo,
Paris XVI^{ème}



Marais

Place du Marché Sainte Catherine,
Paris IV^{ème}



Immeuble - 1950

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



Immeuble - 1970

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



H.B.M.

Place de la porte de Chatillon,
Paris XIV^{ème}



Entrepôts

Rue Victor Hugo,
Ivry-sur-Seine



Z.A.C.

Place du Colonel Fabien,
Paris X^{ème}



Pavillonnaire

Avenue du 8 mai 1945,
Perreux-sur-Marne



Crédits photos InterAtlas

Hypothèses

LCOE

Le LCOE (levelized cost of electricity) est le coût actualisé sur la durée de vie du produit du kWh produit. On actualise les quantités en jeu pour refléter la préférence des investisseurs pour le présent :

Pour le calculer, on somme en effet donc tous les coûts (ici investissement et maintenance) sur la durée de vie du projet (ici prise à 25 ans), pondérés par un facteur plus faible chaque année. On somme ensuite le productible annuel pondéré de la même manière pour obtenir le productible actualisé sur la durée de vie du projet.

Un coût ou un kWh produit la première année n'aura ainsi pas le même poids dans le LCOE qu'un coût ou un kWh produit à la fin de vie du projet, plus d'importance étant affectés aux premiers par le biais de l'actualisation.

Ce taux d'actualisation est fixé à 3% (source : projet PVGIS), ce qui donne deux fois plus de poids aux coûts et productions d'énergie des premières années par rapport aux dernières années. Ce rapport passe à 3 fois plus de poids avec un taux de 5%, et 6 fois plus de poids avec un taux de 8%.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{Costs_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{Prod_t}{(1+r)^t}}$$

Durée de vie du projet

Coûts du système à l'année t

Facteur d'actualisation à l'année t

Production d'énergie du système à l'année t

Hypothèses

Solaire photovoltaïque

Calcul du productible

Le productible est calculé en multipliant le gisement solaire vu par l'installation par son rendement global (panneaux + onduleur).

Le rendement de l'installation est fixé à 15%, une valeur moyenne pour les panneaux à base de silicium cristallin (source : EDF ENR). Le rendement de l'onduleur est fixé à 95% (source : photovoltaïque.info). Une dégradation de la performance de 0.5% par an est intégrée au calcul (source : NREL).

Calcul des coûts

Le coût d'investissement est considéré à 3 €/Wc, ce qui correspond au coût total constaté pour des installations résidentielles inférieures à 9 kWc (source : Quelle Energie). Le coût d'exploitation est fixé à 3 c€/an/Wc (hypothèse de 1% de coût d'investissement initial comme coût de maintenance annuel).

Solaire thermique

Calcul du productible

Le productible est calculé à l'aide de l'algorithme « boucle solaire » de la RT2012, pour des capteurs plans.

Le rendement optique de l'installation est fixé à 70% (rendement du panneau pour une différence de température entre fluide et air extérieur nulle), les pertes du premier ordre à 4 W/m².K et du second ordre à 0.05 W/m².K (source : laboratoire Solartechnik Prüfung Forschung).

Calcul des coûts

le coût d'investissement de 1000 €/m² (source : INES) et d'exploitation de 10 c€/an/m² (hypothèse de 1% de coût d'investissement initial comme coût de maintenance annuel).

Gisement solaire

Calcul du gisement théorique disponible

Le gisement théorique correspond au cumul de l'irradiation solaire sur toutes les surfaces de toitures de la typologie étudiée (sur lesquelles l'irradiation est supérieure à 800 kWh/m²).

Calcul du gisement pour chaque installation

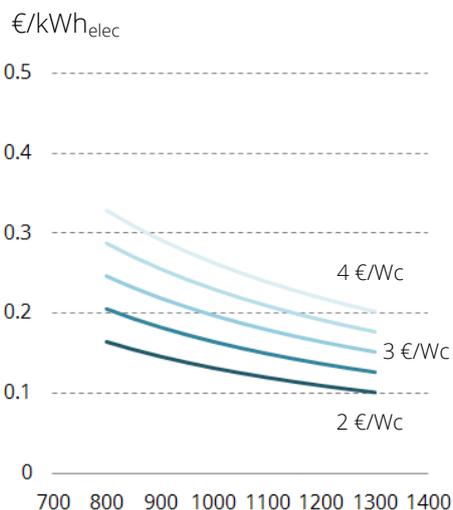
Un modèle horaire de rayonnement dans le plan des capteurs est utilisé : à chaque heure de l'année, la course du soleil vue depuis chaque installation est analysée pour prendre en compte les masques proches.

Les données météorologiques sont issues de Météonorm : une année typique mesurée à la station Paris-Montsouris.

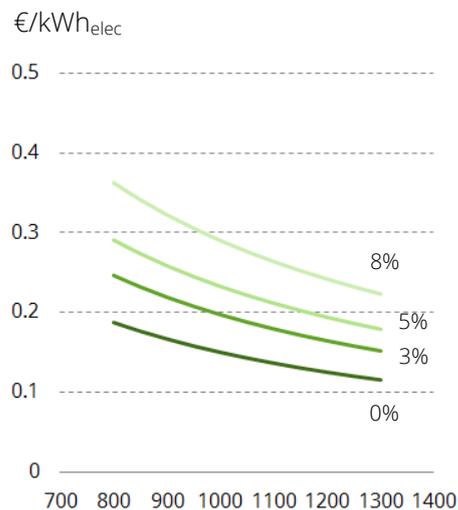
Sensibilité

La sensibilité du LCOE à ces hypothèses, pour un système photovoltaïque par exemple, peut être visualisée par les graphes ci-dessous : chacun présente l'impact sur le LCOE des variables les plus critiques, toutes choses égales par ailleurs, en fonction du gisement disponible.

Influence sur le LCOE du prix de l'installation, en fonction du gisement disponible



Influence sur le LCOE du taux d'actualisation considéré, en fonction du gisement disponible



Résumé des résultats

Intégration des panneaux

L'approche adoptée par cette étude permet d'estimer la surface de panneaux installable par typologie du tissu pour obtenir des rendements intéressants à Paris lorsque le gisement est suffisant (800 kWh/m²), sans nécessité de surélévation.

On estime donc ici les potentiels minimums mobilisables sur chaque typologie, potentiels qui pourront être revus à la hausse si les contraintes de rendement et d'intégration (par la surélévation notamment) sont assouplies.

Le potentiel maximum d'intégration est rappelé ci-dessous par 3 cas idéaux sur des toitures ou des surélévations non

obstruées, non masquées et orientées au Sud :

- Panneaux à plat sur une terrasse.
- Panneaux en pente de 30° sur un pan de toiture.
- Panneaux inclinés de 30° et en rangée sur une terrasse.

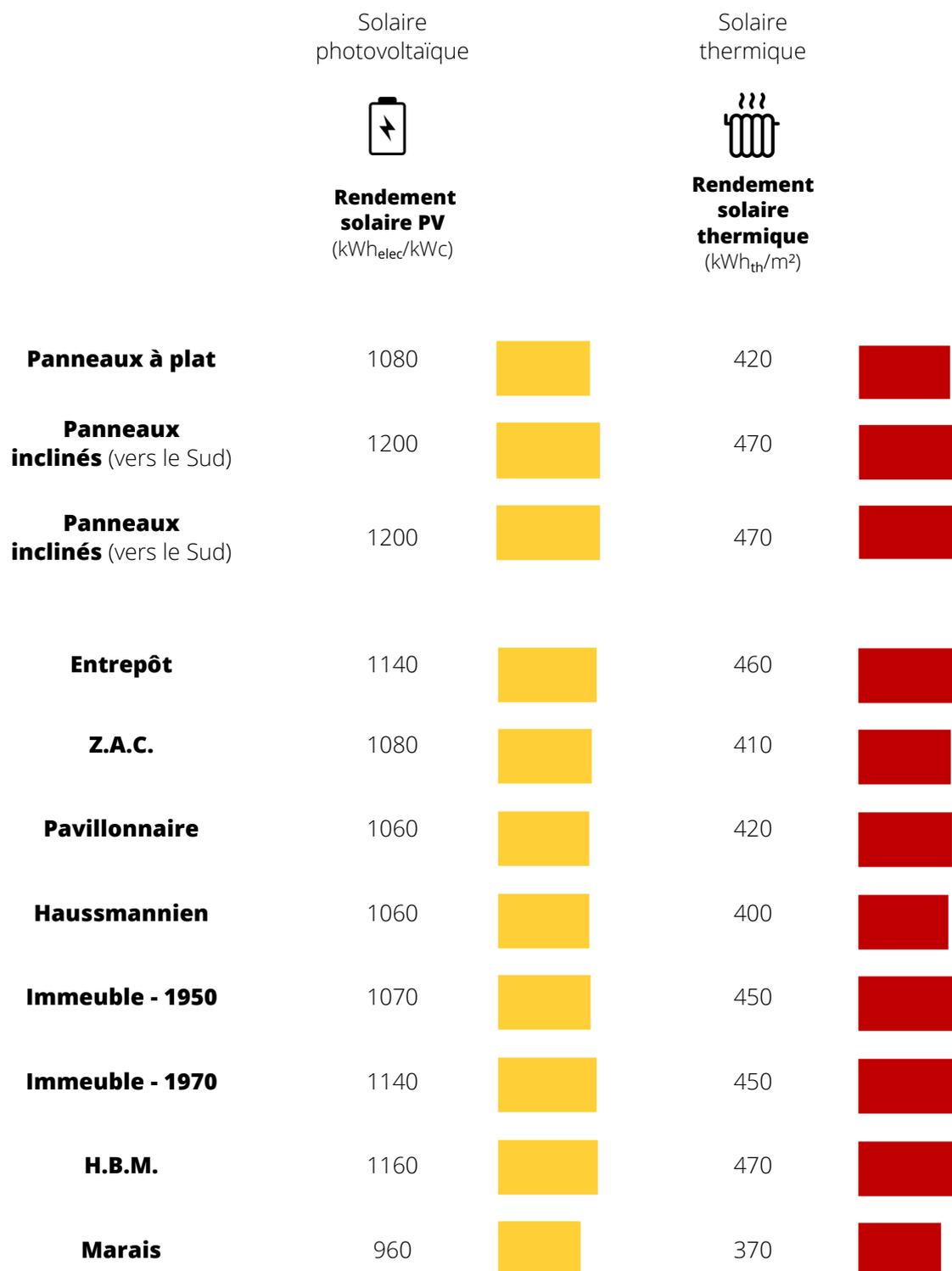
	 Emprise de toiture installable (%)	 Inclinaison des panneaux (°)
Panneaux à plat	90 % 	0° 
Panneaux inclinés (vers le Sud) (1 pan de toiture)	45 %  (1 pan de toiture)	30° 
Panneaux inclinés (vers le Sud) (en rangées)	23 %  (en rangées)	30° 
Entrepôt	17 % 	30° 
Z.A.C.	11 % 	5 - 15° 
Pavillonnaire	10 % 	25 - 35° 
Hausmannien	9 % 	15 - 25° 
Immeuble - 1950	7 % 	35 - 45° 
Immeuble - 1970	3 % 	30° 
H.B.M.	3 % 	30° 
Marais	3 % 	30 - 45° 

Résumé des résultats

Rendements obtenus

Le rendement correspond à l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en énergie utile, électricité ou chaleur, pour une surface d'installation donnée.

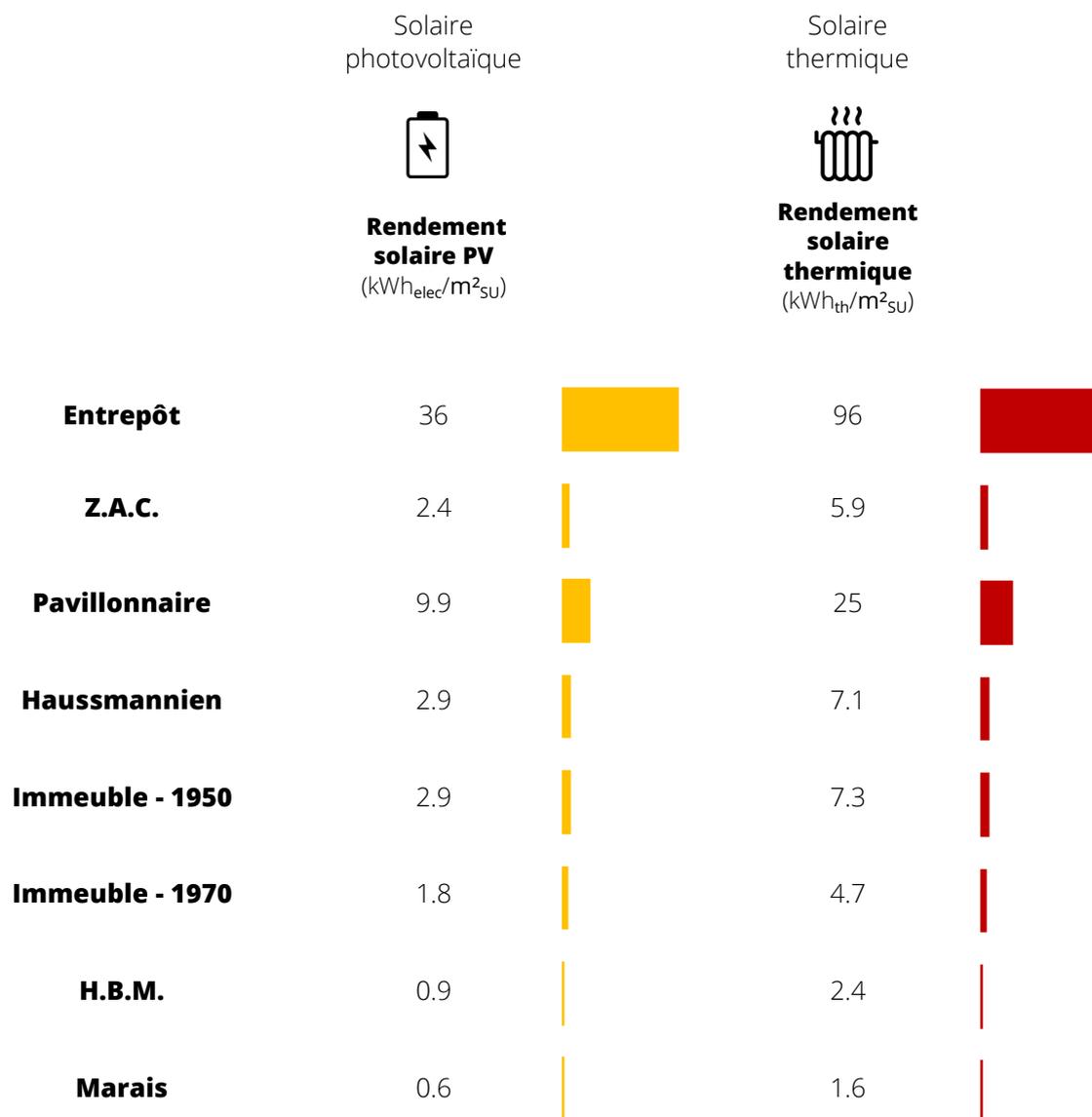
La puissance crête est souvent utilisée pour le photovoltaïque, car elle est directement proportionnelle à la surface d'une installation par le biais du rendement des panneaux ($P_c = \eta \cdot S \cdot P_{STC}$ avec P_{STC} la puissance d'un mètre carré de panneau dans les conditions standard de test).



Résumé des résultats

Productible par unité de surface utile

Même si deux typologies donnent le même rendement, elles ne présentent pas le même potentiel de couverture des besoins d'énergie des bâtiments : plus un tissu est dense du point de vue de la surface construite par unité de toiture et plus le ratio de l'énergie produite et de la surface des bâtiments sera faible.



Hausmannien

av. Poincaré, rues de Sfax et de Sontay,
Paris XVI^{ème}

La typologie « Haussmann », avec ses toitures « à la Mansard », comporte des éléments qui limitent les emplacements potentiels et la taille des systèmes installables : différences de hauteurs entre bâtiments, ruptures de pente entre brisis et terrassons, cheminées...



Hausmannien

av. Poincaré, rues de Sfax et de Sontay,
Paris XVI^{ème}



2 990 m²
Surface de toiture
projetée



1 670 MWh
Gisement théorique
disponible

Positionnement des systèmes en toiture

Caractéristiques des installations :



28
Nombre d'installations
possibles



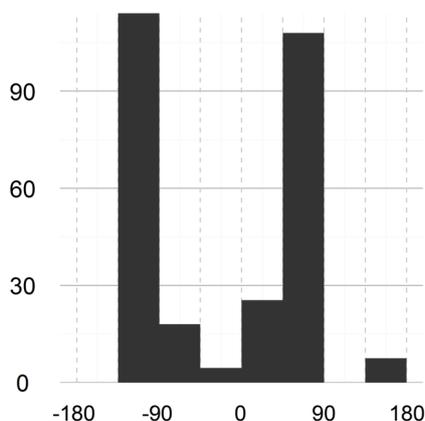
290 m² (proj. : 270 m²)
9% de la toiture
Surface de panneaux



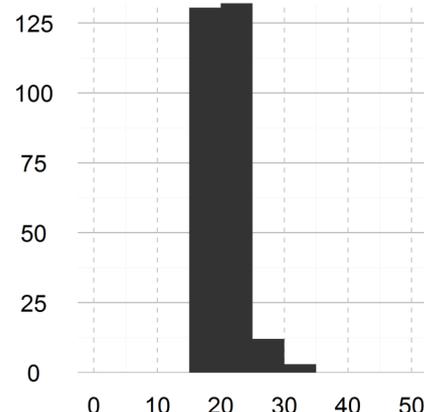
Est + Sud Ouest
Orientations majoritaires



15 - 25 °
Inclinaison majoritaire



Surface de panneaux (m²)
par secteur d'orientation (°)



Surface de panneaux (m²)
par inclinaison (°)

Les panneaux sont
implantés sur les
terrassons des toitures.

L'orientation des bâtiments
de l'îlot conditionne deux
grandes orientations : Est
et Sud-Ouest

Les zones mal exposées et de
formes irrégulières sont
écartées lors du positionne-
ment, bien que des systèmes
de surélévation permettraient
d'augmenter le potentiel

Les obstacles de la toiture
comme les cheminées
sont bien contournés par
la procédure.

100 à 1200 kWh/m²



Positionnement des panneaux et gisement solaire disponible

Haussmannien

av. Poincaré, rues de Sfax et de Sontay,
Paris XVI^{ème}



2 990 m²
Surface de toiture
projetée



1 670 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire photovoltaïque

**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



43 kWc
Puissance installable



46 MWh_{elec}/an
Energie produite
annuellement



1060 kWh_{elec}/kWc
Rendement

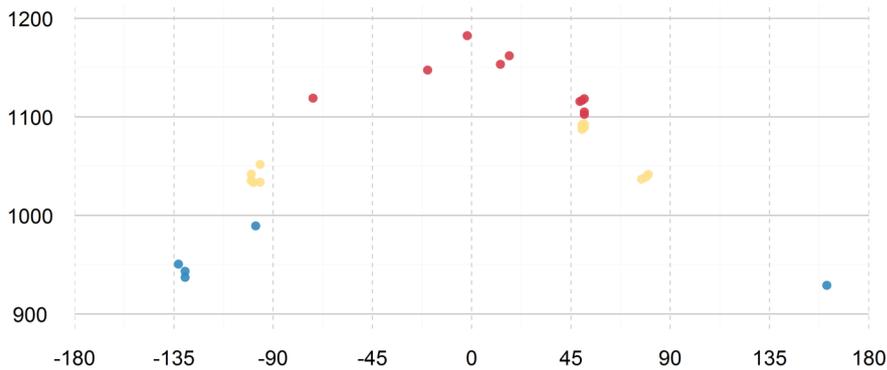
Couverture des usages :



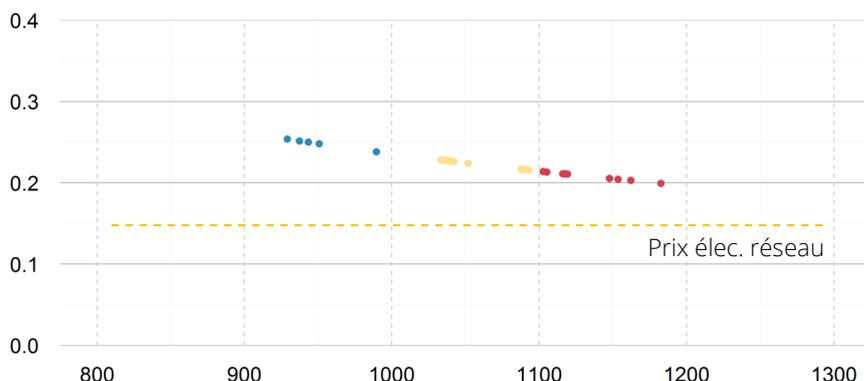
16 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



2.9 kWh_{elec}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**Rendement des installations (kWh_{elec}/kWc)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**



**LCOE (€/kWh_{elec}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**

Les panneaux orientés Sud-Ouest, produisant surtout l'après midi, ont des rendements compris entre 1000 et 1100 kWh/kWc.

Les meilleurs rendements (> 1100 kWh/kWc) sont logiquement obtenus pour les panneaux orientés vers le Sud, avec un LCOE atteignant environ 0.2 €/kWh.

Certains panneaux orientés Est, produisant surtout le matin, parviennent à dépasser les 1000 kWh/kWc.

- > 1100 kWh/kWc
- 1000 - 1100 kWh/kWc
- < 1000 kWh/kWc
- 1000 kWh/kWc



Rendement des installations

Energie produite / Puissance installée, kWh_{elec}/kWc

Hausmannien

av. Poincaré, rues de Sfax et de Sontay,
Paris XVI^{ème}



2 990 m²
Surface de toiture
projetée



1 670 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire thermique

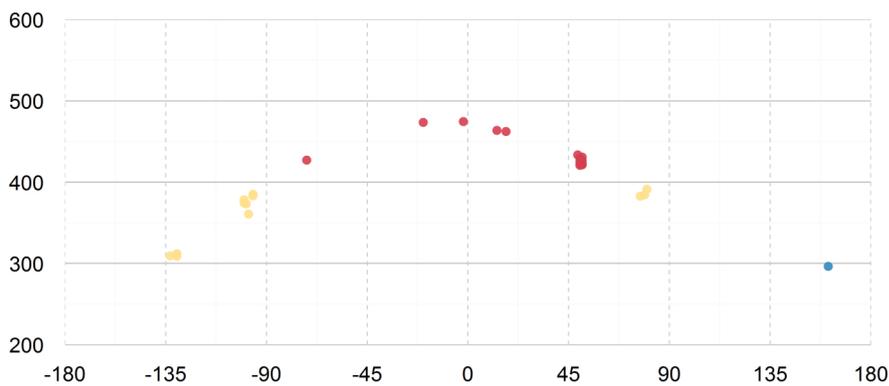
**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



114 MWh_{th}/an
Energie produite
annuellement



400 kWh_{th}/m²/an
Rendement



**Rendement des installations (kWh_{th}/m²)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

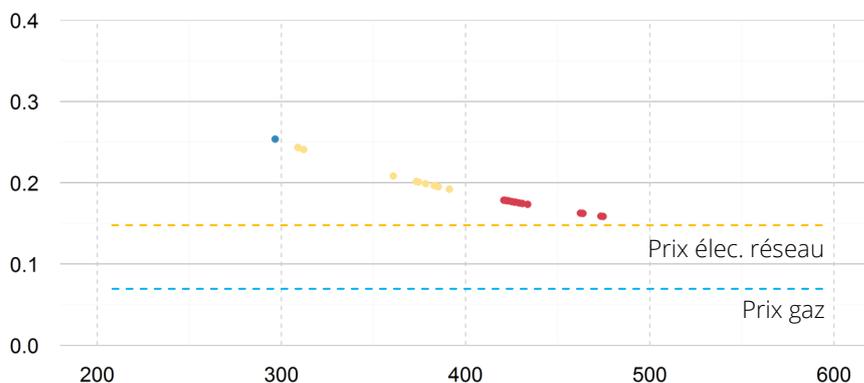
Couverture des usages :



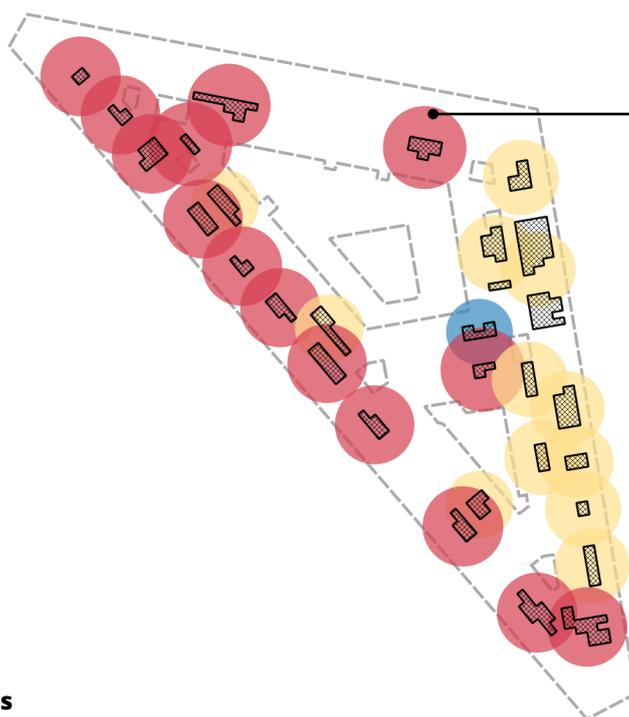
16 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



7.1 kWh_{th}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{th}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



Comme pour le PV, les
meilleurs rendements sont
obtenus pour les panneaux
orientés vers le Sud, avec un
LCOE atteignant environ
0.16 €/kWh.

- > 400 kWh/m²
- 300 - 400 kWh/m²
- < 300 kWh/m²
- 300 kWh/m²

Rendement des installations

Energie produite / Surface installée, kWh_{th}/m²

Marais

Place du Marché Sainte Catherine,
Paris IV^{ème}

Les bâtiments du Marais sont proches les uns des autres, ont des hauteurs différentes et présentent des toitures irrégulières, ce qui limite à la fois le nombre de zones d'implantation et le gisement solaire disponible.



Marais

Place du Marché Sainte Catherine,
Paris IV^{ème}



8 540 m²
Surface de toiture
projetée



2 860 MWh
Gisement théorique
disponible

Positionnement des systèmes en toiture

Caractéristiques des installations :



30
Nombre d'installations
possibles



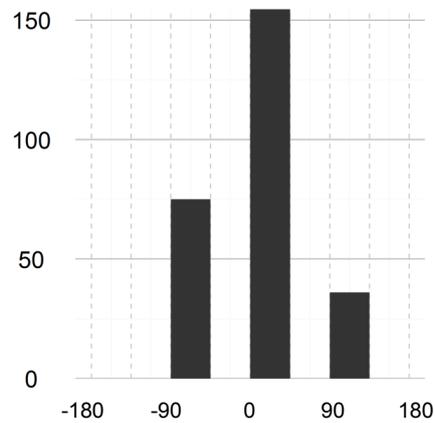
265 m² (proj. : 220 m²)
3% de la toiture
Surface de panneaux



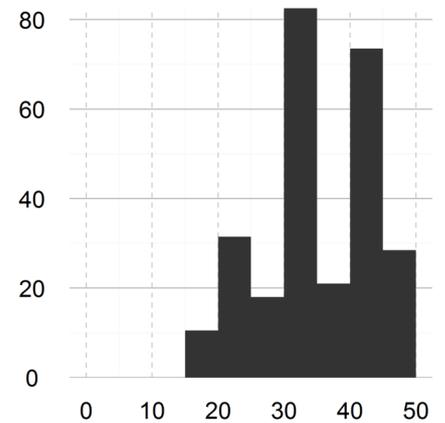
Sud
Orientation majoritaire



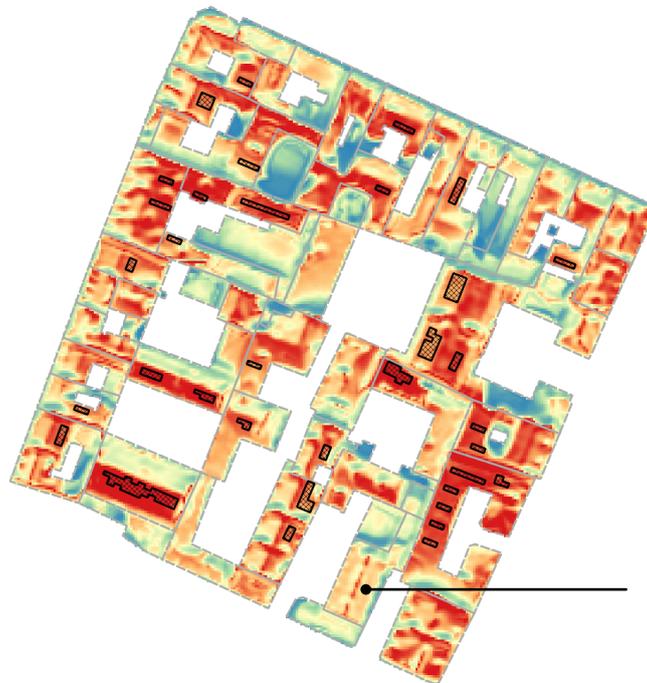
30 - 45 °
Inclinaison majoritaire



Surface de panneaux (m²)
par secteur d'orientation (°)



Surface de panneaux (m²)
par inclinaison (°)



Les bâtiments ont des hauteurs variables et sont proches les uns des autres, créant de nombreux masques limitant le gisement solaire de certains pans de toitures.

100 à 1200 kWh/m²



**Positionnement des panneaux
et gisement solaire disponible**

Marais

Place du Marché Sainte Catherine,
Paris IV^{ème}



8 540 m²
Surface de toiture
projetée



2 860 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire photovoltaïque

**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



23 kWc
Puissance installable



25 MWh_{elec}/an
Energie produite
annuellement



960 kWh_{elec}/kWc
Rendement

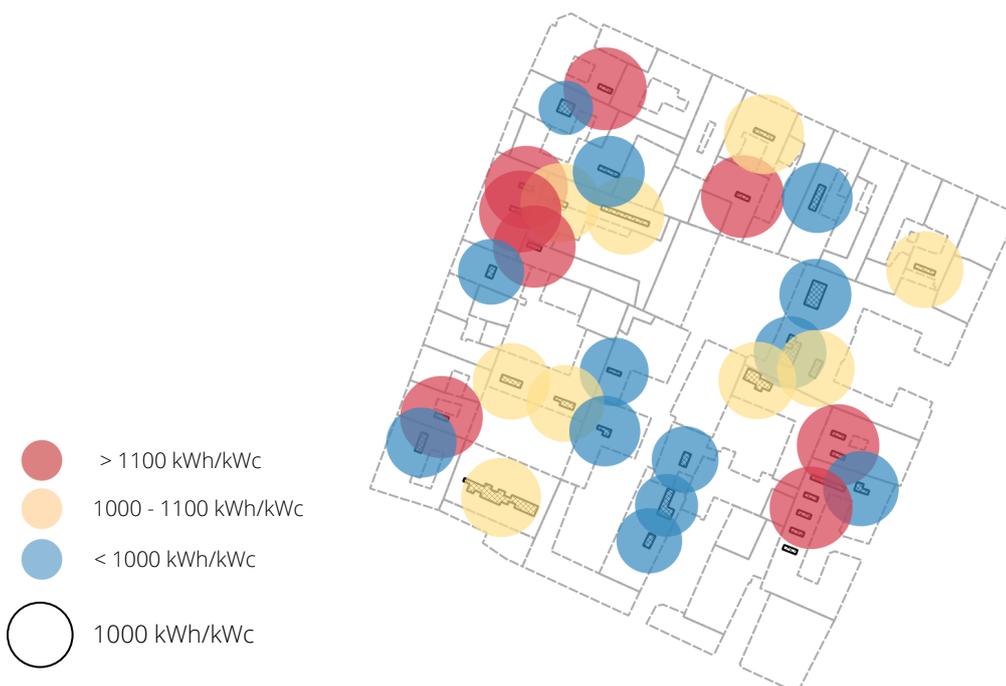
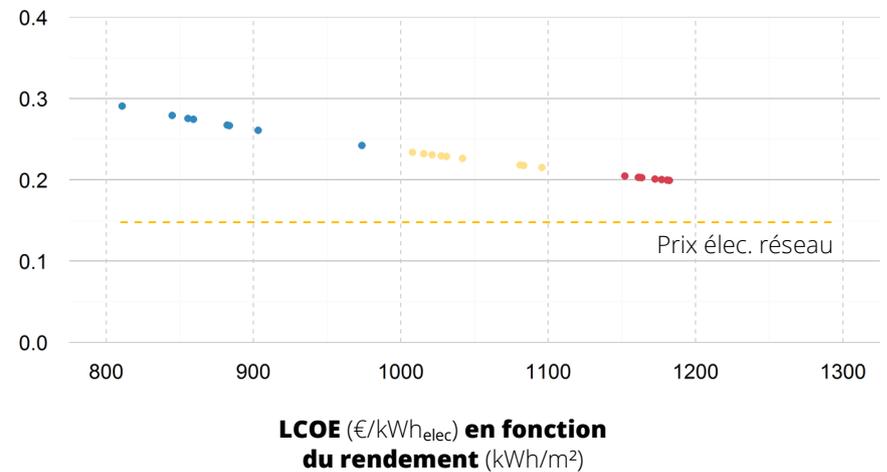
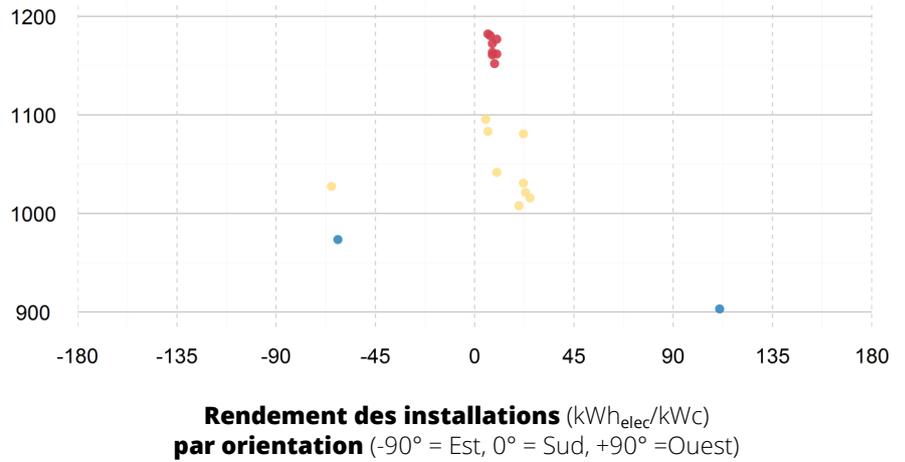
Couverture des usages :



42 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



0.6 kWh_{elec}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



Rendement des installations

Energie produite / Puissance installée, kWh_{elec}/kWc

Marais

Place du Marché Sainte Catherine,
Paris IV^{ème}



8 540 m²
Surface de toiture
projetée



2 860 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire thermique

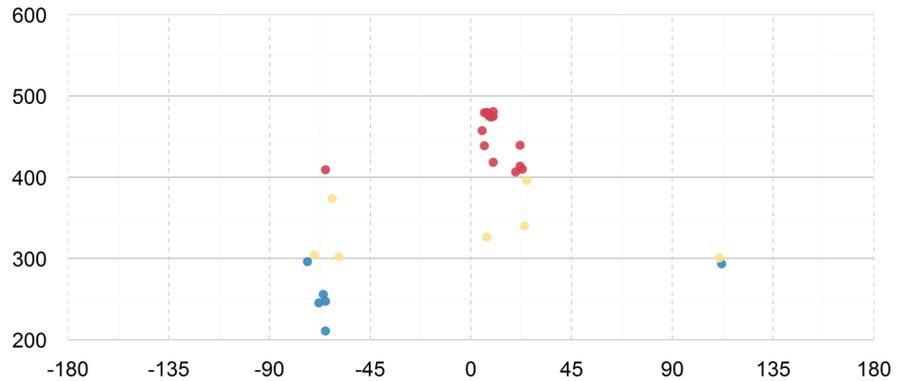
**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



69 MWh_{th}/an
Energie produite
annuellement



370 kWh_{th}/m²/an
Rendement



**Rendement des installations (kWh_{th}/m²)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

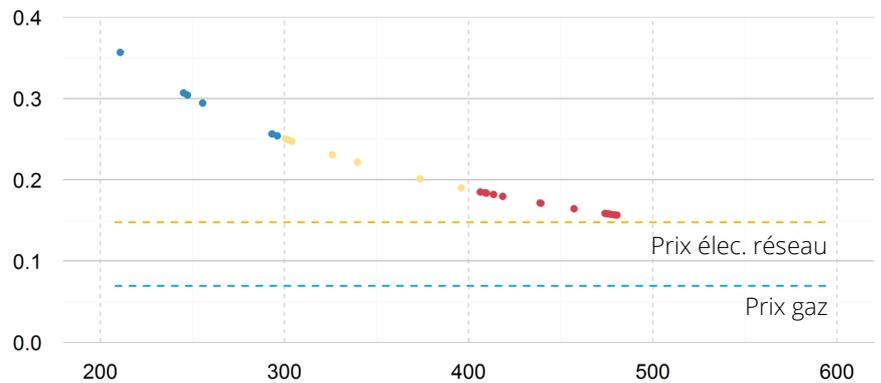
Couverture des usages :



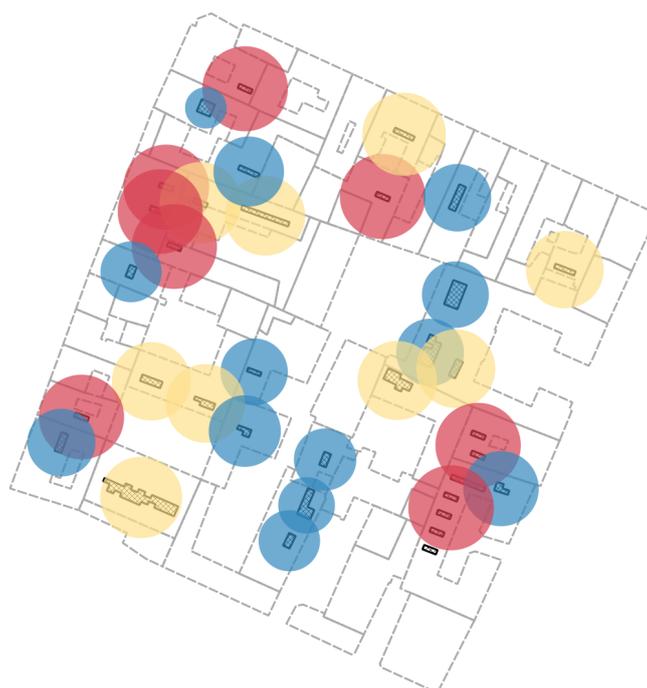
42 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



1.6 kWh_{th}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{th}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



- > 400 kWh/m²
- 300 - 400 kWh/m²
- < 300 kWh/m²

 300 kWh/m²

Rendement des installations

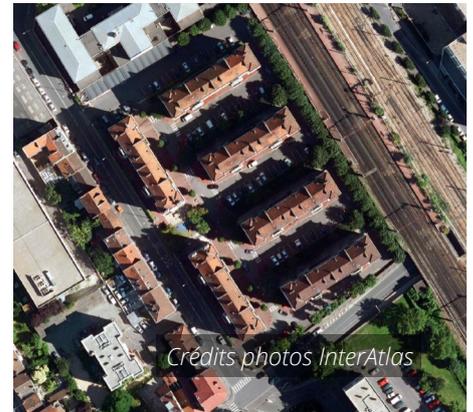
Energie produite / Surface installée, kWh_{th}/m²

Immeuble - 1950

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine

Les toitures des immeubles étudiés disposent de toitures inclinées d'environ 40 ° assez peu encombrés.

Un pan sur deux (celui orienté vers le secteur Sud, Sud Est ou Sud Ouest), permet ainsi une installation de panneaux au rendement intéressant, malgré la présence de bâtiments voisins créant des masques limitant le gisement solaire disponible (surtout en hiver quand le soleil est bas).



Immeuble - 1950

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



2 570 m²
Surface de toiture
projetée



1 180 MWh
Gisement théorique
disponible

Positionnement des systèmes en toiture

Caractéristiques des installations :



12

Nombre d'installations
possibles



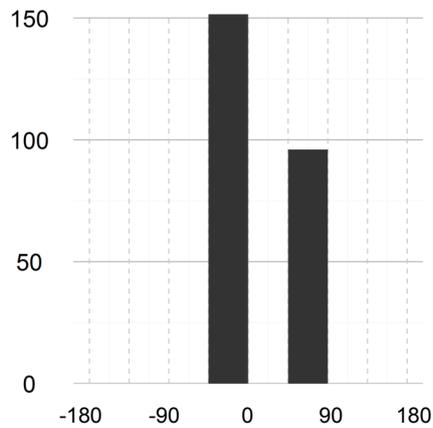
250 m² (proj. : 190 m²)
7% de la toiture
Surface de panneaux



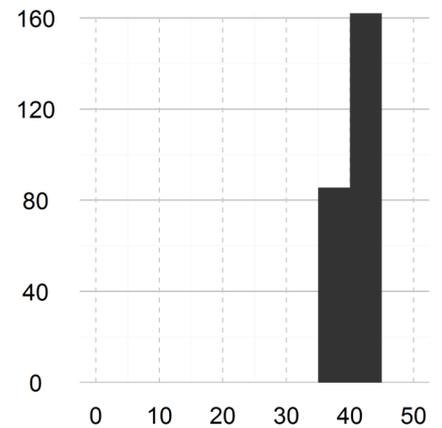
Sud-Est + Sud-Ouest
Orientation majoritaire



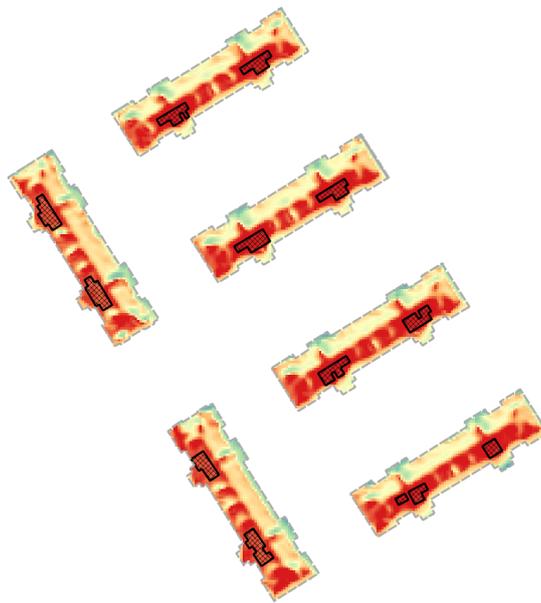
35 - 45 °
Inclinaison majoritaire



Surface de panneaux (m²)
par secteur d'orientation (°)



Surface de panneaux (m²)
par inclinaison (°)



100 à 1200 kWh/m²



**Positionnement des panneaux
et gisement solaire disponible**

Immeuble - 1950

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



2 570 m²
Surface de toiture
projetée



1 180 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire photovoltaïque

**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



37 kWc
Puissance installable



40 MWh_{elec}/an
Energie produite
annuellement



1070 kWh_{elec}/kWc
Rendement

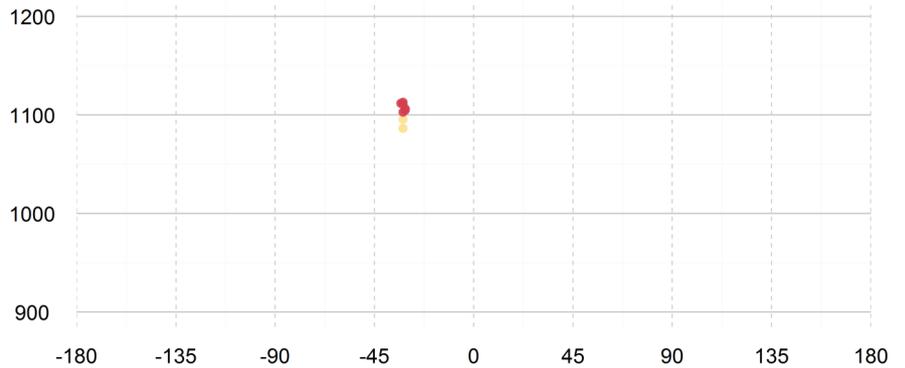
Couverture des usages :



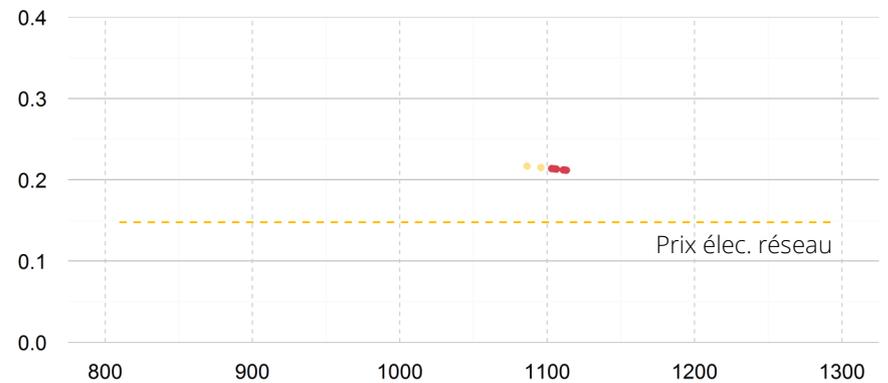
14 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



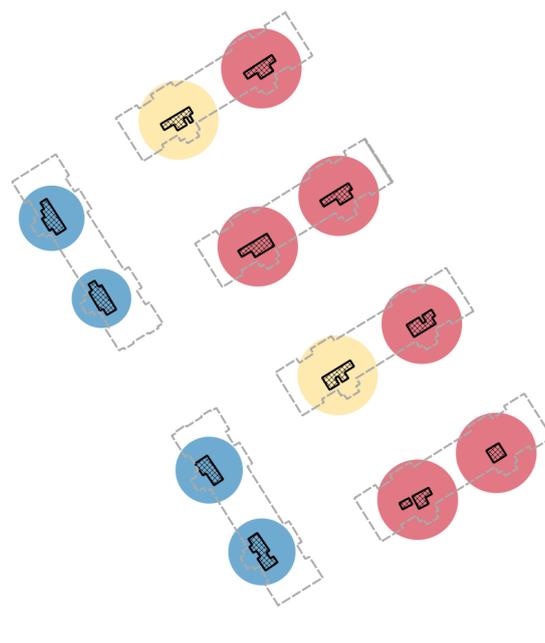
2.9 kWh_{elec}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



Rendement des installations (kWh_{elec}/kWc)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)



LCOE (€/kWh_{elec}) **en fonction
du rendement** (kWh/m²)



- > 1100 kWh/kWc
- 1000 - 1100 kWh/kWc
- < 1000 kWh/kWc

 1000 kWh/kWc

Rendement des installations

Energie produite / Puissance installée, kWh_{elec}/kWc

Immeuble - 1950

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



2 570 m²
Surface de toiture
projetée



1 180 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire thermique

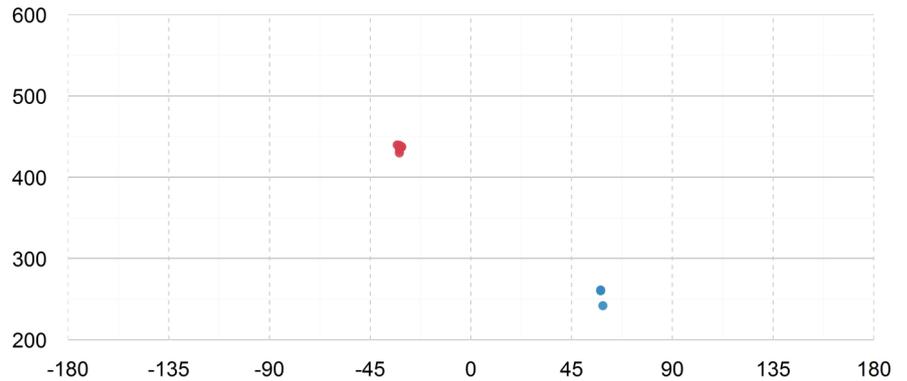
**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



102 MWh_{th}/an
Energie produite
annuellement



410 kWh_{th}/m²/an
Rendement



**Rendement des installations (kWh_{th}/m²)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

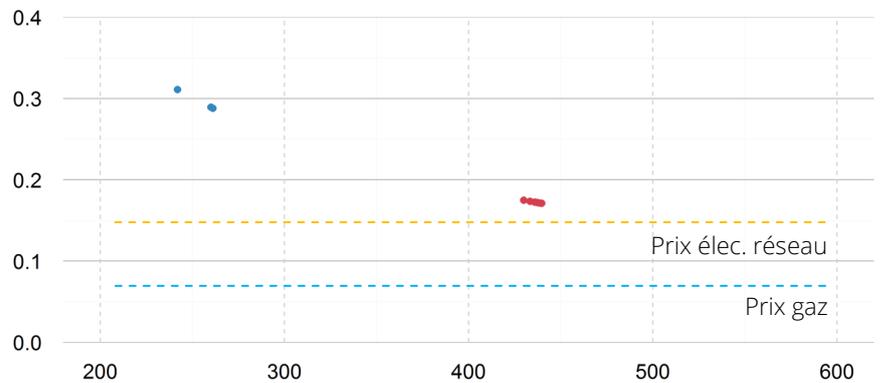
Couverture des usages :



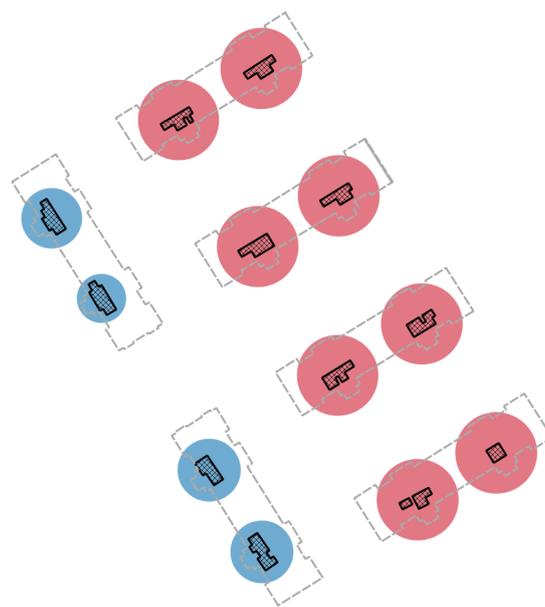
14 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



7.3 kWh_{th}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{th}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



- > 400 kWh/m²
- 300 - 400 kWh/m²
- < 300 kWh/m²
- 300 kWh/m²

Rendement des installations

Energie produite / Surface installée, kWh_{th}/m²

Immeuble - 1970

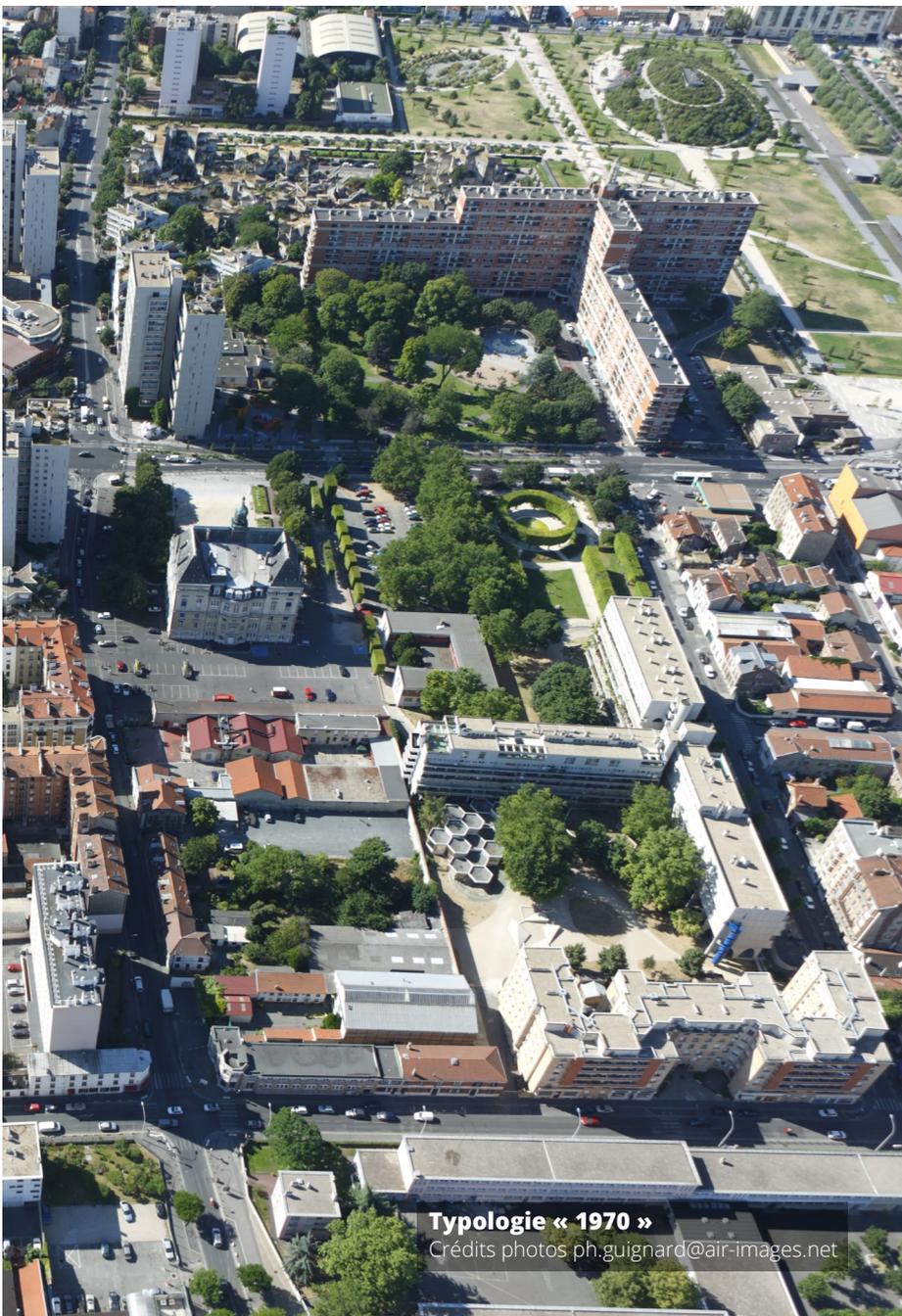
Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine

Le bâtiment étudié dispose de toitures terrasses encombrées par des sorties de gaines techniques hautes (1 à 2 mètres), ce qui limite les surfaces des zones d'implantation des panneaux et le gisement solaire disponible en créant de nombreux masques.

Le recours à des pergolas qui permettraient de s'affranchir de ces obstacles augmenterait grandement le potentiel.



Crédits photos InterAtlas



Typologie « 1970 »

Crédits photos ph.guignard@air-images.net

Immeuble - 1970

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



2 500 m²
Surface de toiture
projetée



1 450 MWh
Gisement théorique
disponible

Positionnement des systèmes en toiture

Caractéristiques des installations :



17

Nombre d'installations
possibles



135 m² (proj. : 120 m²)
5% de la toiture
Surface de panneaux



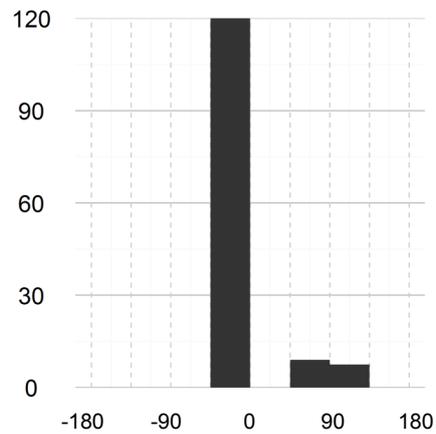
Sud-Est

Orientation majoritaire

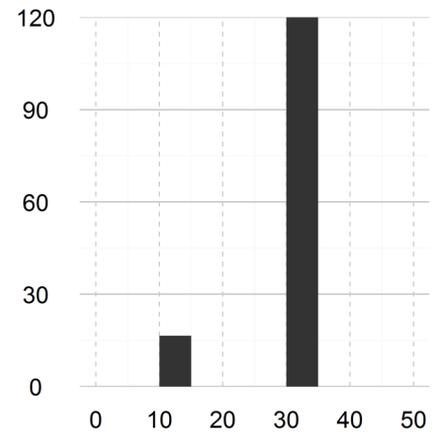


30 °

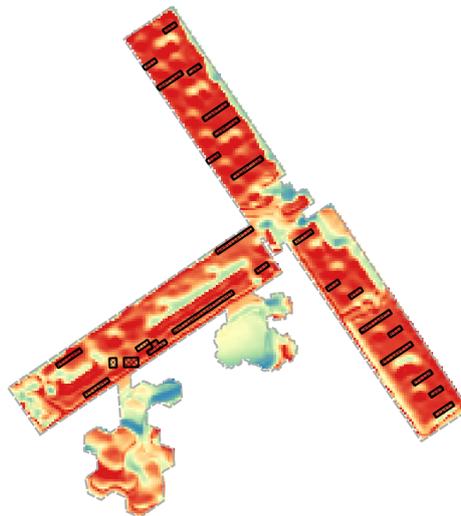
Inclinaison majoritaire



Surface de panneaux (m²)
par secteur d'orientation (°)



Surface de panneaux (m²)
par inclinaison (°)



100 à 1200 kWh/m²



**Positionnement des panneaux
et gisement solaire disponible**

Immeuble - 1970

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



2 500 m²
Surface de toiture
projetée



1 450 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire photovoltaïque

**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



20 kWc
Puissance installable



23 MWh_{elec}/an
Energie produite
annuellement



1140 kWh_{elec}/kWc
Rendement

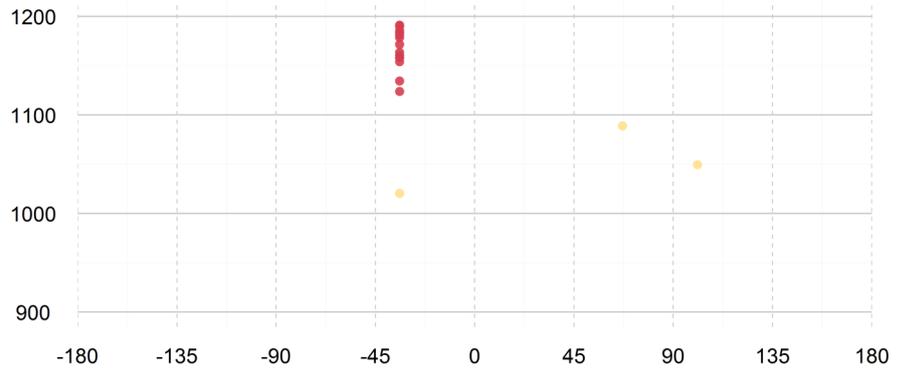
Couverture des usages :



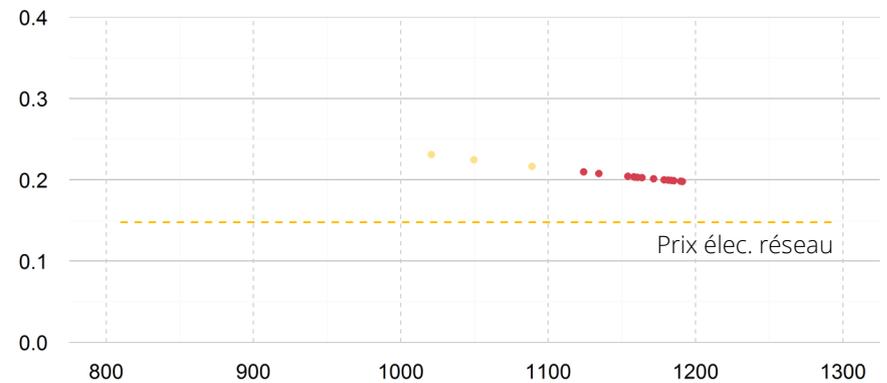
13 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



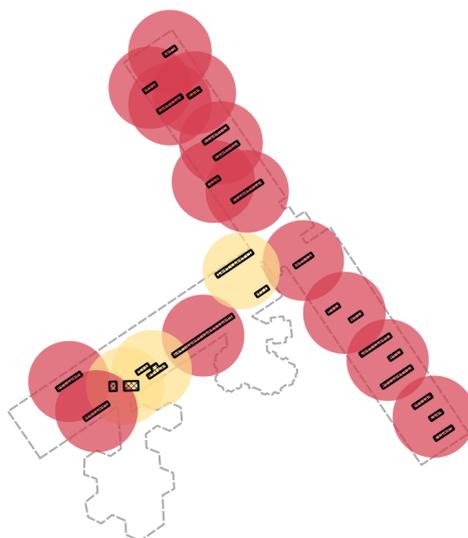
1.8 kWh_{elec}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**Rendement des installations (kWh_{elec}/kWc)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**



**LCOE (€/kWh_{elec}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



- > 1100 kWh/kWc
- 1000 - 1100 kWh/kWc
- < 1000 kWh/kWc
- 1000 kWh/kWc

Rendement des installations

Energie produite / Puissance installée, kWh_{elec}/kWc

Immeuble - 1970

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine

 **2 500** m²
Surface de toiture
projetée

 **1 450** MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire thermique

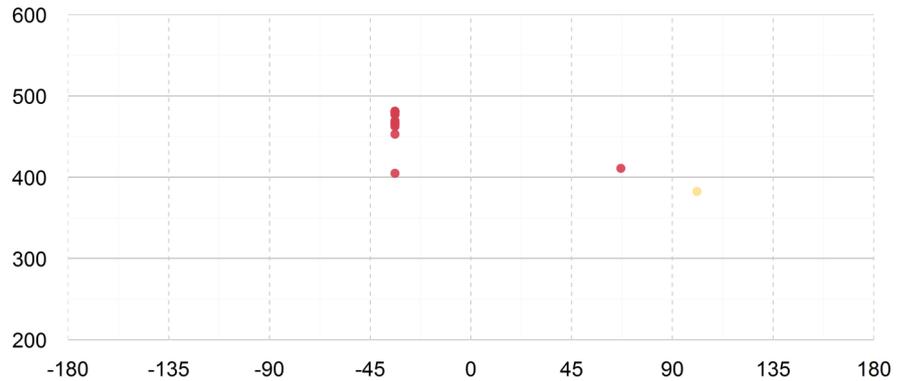
**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



61 MWh_{th}/an
Energie produite
annuellement



450 kWh_{th}/m²/an
Rendement



**Rendement des installations (kWh_{th}/m²)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

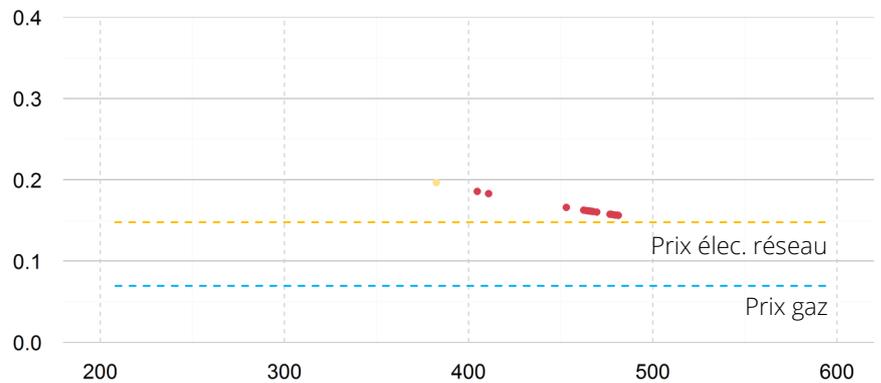
Couverture des usages :



13 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



4.7 kWh_{th}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{th}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



-  > 400 kWh/m²
-  300 - 400 kWh/m²
-  < 300 kWh/m²
-  300 kWh/m²

Rendement des installations

Energie produite / Surface installée, kWh_{th}/m²

H.B.M.

Place de la porte de Chatillon,
Paris XIV^{ème}

La typologie « HBM » dispose de toitures terrasses dégagées des masques environnants (du fait de leur hauteur à plus de 90 m, au dessus de la cime des arbres).

Le gisement solaire disponible est cependant très variable, les terrasses étant saturées d'obstacles hauts de 1 à 2 mètres qui contraignent fortement le positionnement des panneaux, comme pour la typologie « immeuble - 1950 ».



Crédits photos InterAtlas



Typologie « H.B.M. »

Crédits photos ph.guignard@air-images.net



Positionnement des systèmes en toiture

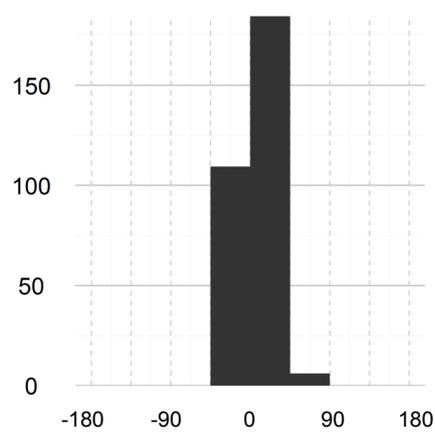
Caractéristiques des installations :

**56**Nombre d'installations
possibles**300** m² (proj. : 260 m²)
3% de la toiture
Surface de panneaux**Sud**

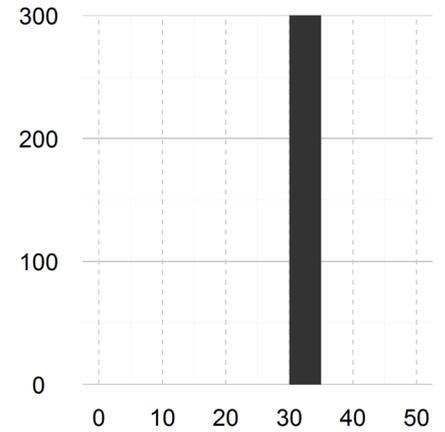
Orientation majoritaire

**30 °**

Inclinaison majoritaire



Surface de panneaux (m²)
par secteur d'orientation (°)



Surface de panneaux (m²)
par inclinaison (°)

100 à 1200 kWh/m²

Positionnement des panneaux et gisement solaire disponible



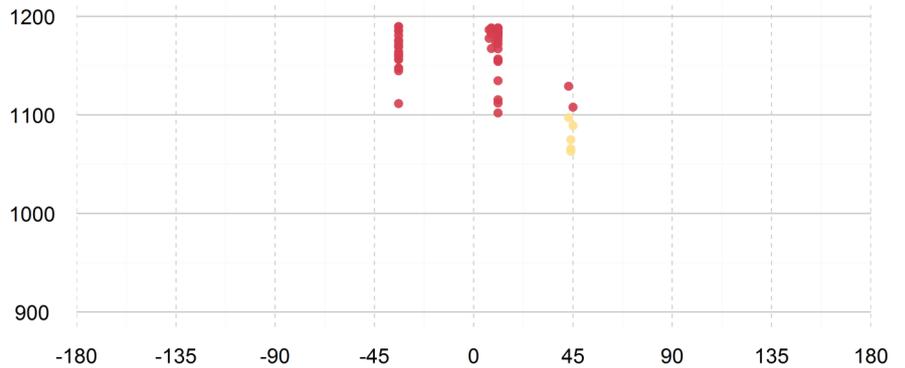
Solaire photovoltaïque

**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**

45 kWc
Puissance installable

52 MWh_{elec}/an
Energie produite
annuellement

1160 kWh_{elec}/kWc
Rendement

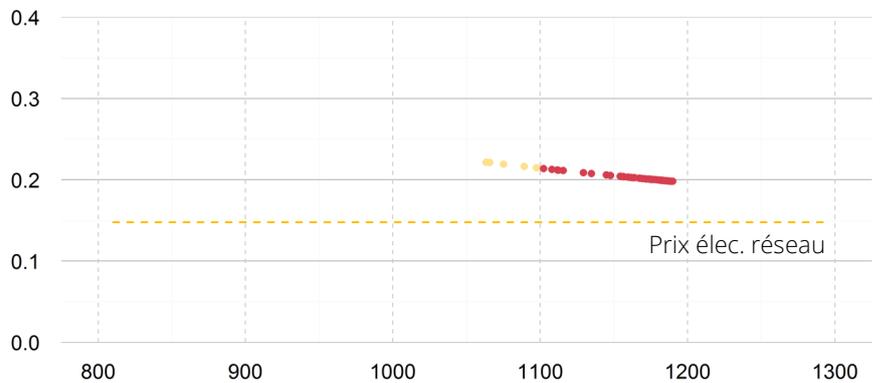


**Rendement des installations (kWh_{elec}/kWc)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

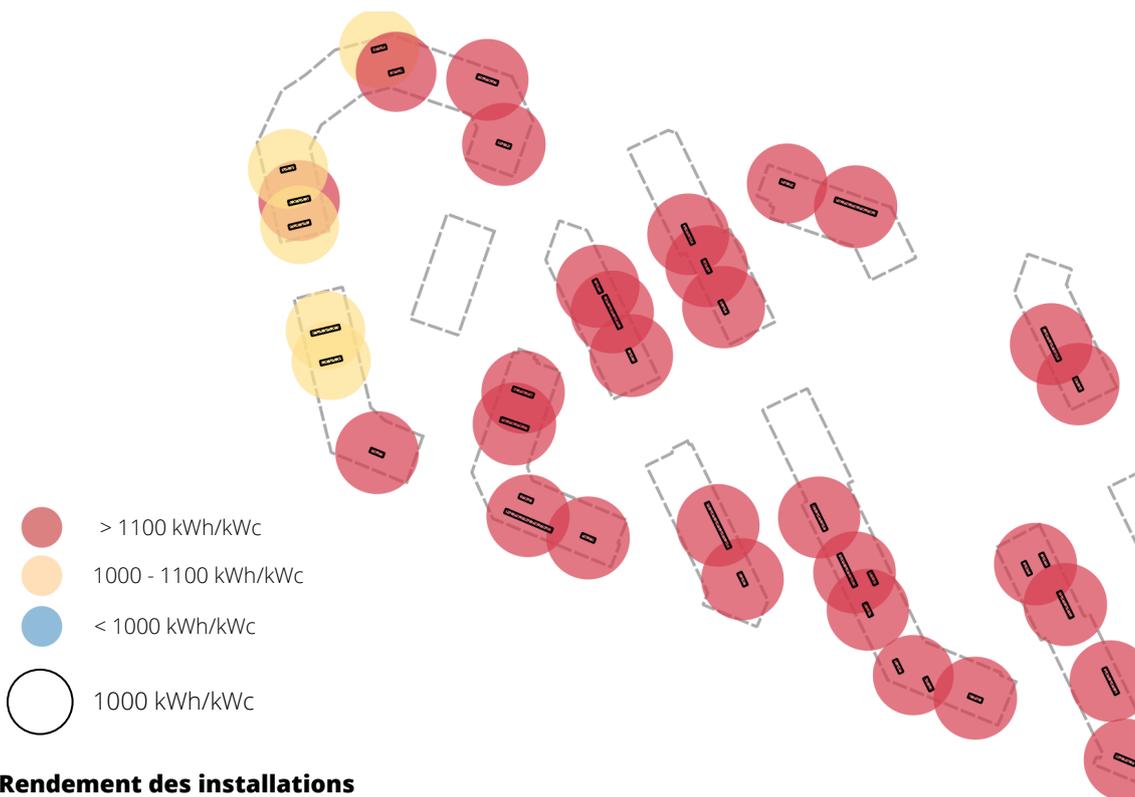
Couverture des usages :

58 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée

0.9 kWh_{elec}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{elec}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



- > 1100 kWh/kWc
- 1000 - 1100 kWh/kWc
- < 1000 kWh/kWc
- 1000 kWh/kWc

Rendement des installations

Energie produite / Puissance installée, kWh_{elec}/kWc



Solaire thermique

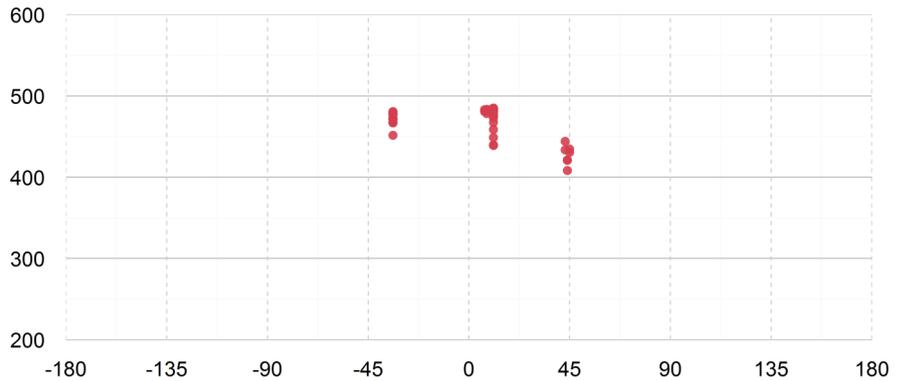
**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



141 MWh_{th}/an
Energie produite
annuellement



470 kWh_{th}/m²/an
Rendement



**Rendement des installations (kWh_{th}/m²)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

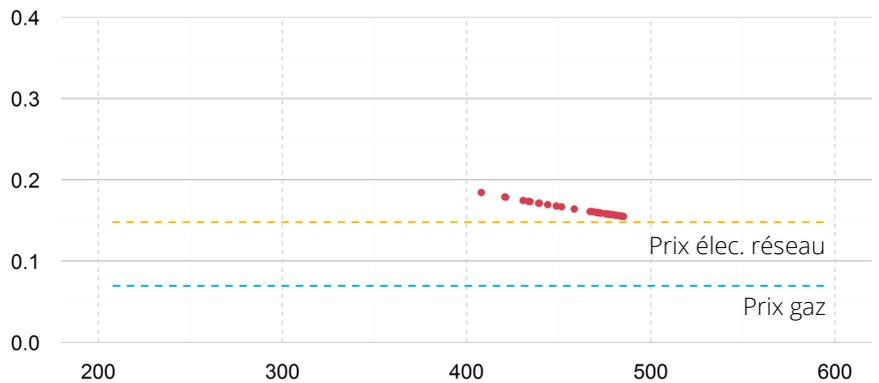
Couverture des usages :



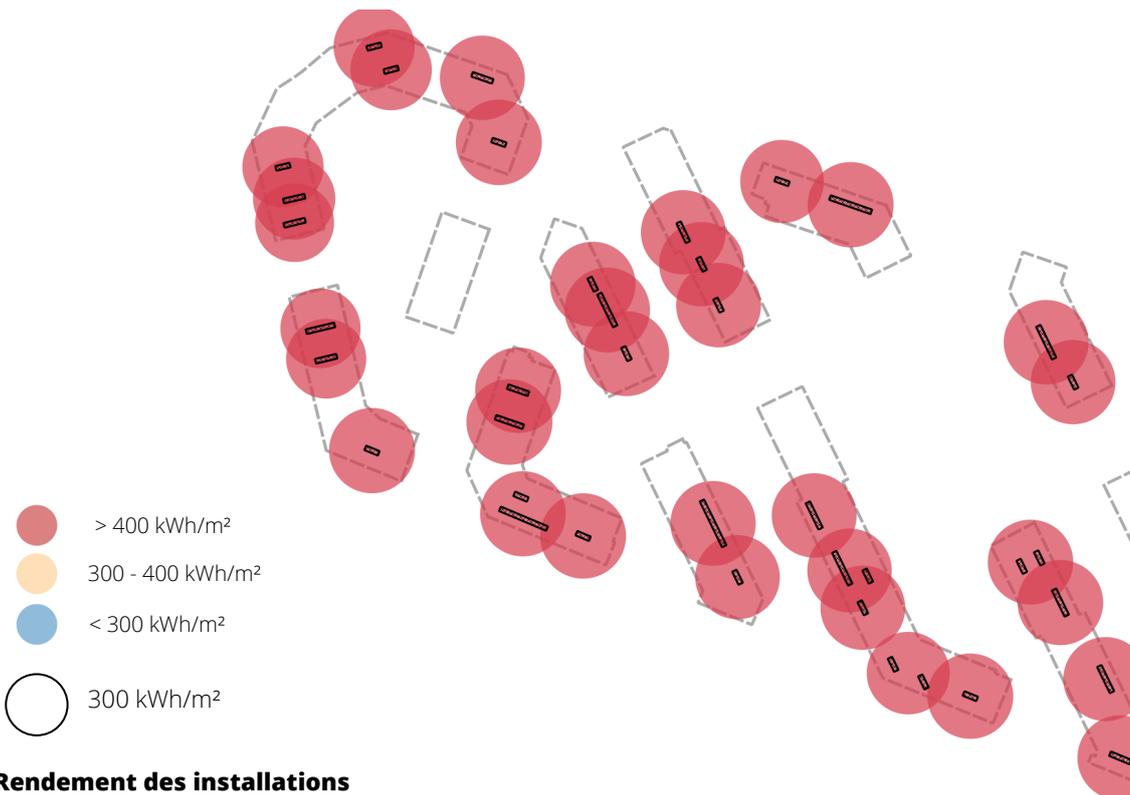
58 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



2.4 kWh_{th}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{th}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



- > 400 kWh/m²
- 300 - 400 kWh/m²
- < 300 kWh/m²
- 300 kWh/m²

Rendement des installations

Energie produite / Surface installée, kWh_{th}/m²

Entrepôts

Rue Victor Hugo,
Ivry-sur-Seine



7 350 m²
Surface de toiture
projetée

Les toitures des entrepôts permettent d'installer des systèmes avec un grand nombre de panneaux, malgré la présence des cheminées, des ouvrants de désenfumage et des systèmes d'éclairage zénithaux.

Ces éléments sont en effet implantés de manière régulière, ce qui permet un positionnement des rangées de panneaux également régulier tout en contournant les obstacles. 17% de la surface d'emprise de toiture peut ainsi être couverte, ce qui se rapproche des

23% maximum installables sur des toitures terrasses parfaitement dégagées.

L'implantation des bâtiments donne une orientation exclusivement Sud Est aux panneaux, pour une inclinaison de 30° (fixée pour les panneaux en rangées sur les toitures terrasses).



Entrepôts

Rue Victor Hugo,
Ivry-sur-Seine



7 350 m²
Surface de toiture
projetée



9 530 MWh
Gisement théorique
disponible

Positionnement des systèmes en toiture

Caractéristiques des installations :



14

Nombre d'installations
possibles



1450 m² (proj. : 1265 m²)
17% de la toiture
Surface de panneaux



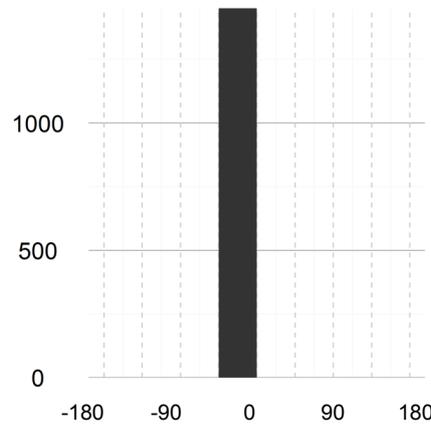
Sud Est

Orientation majoritaire

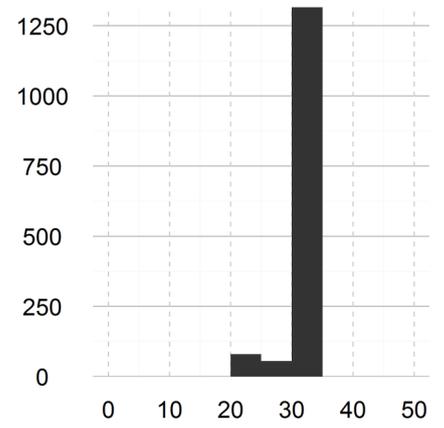


30 °

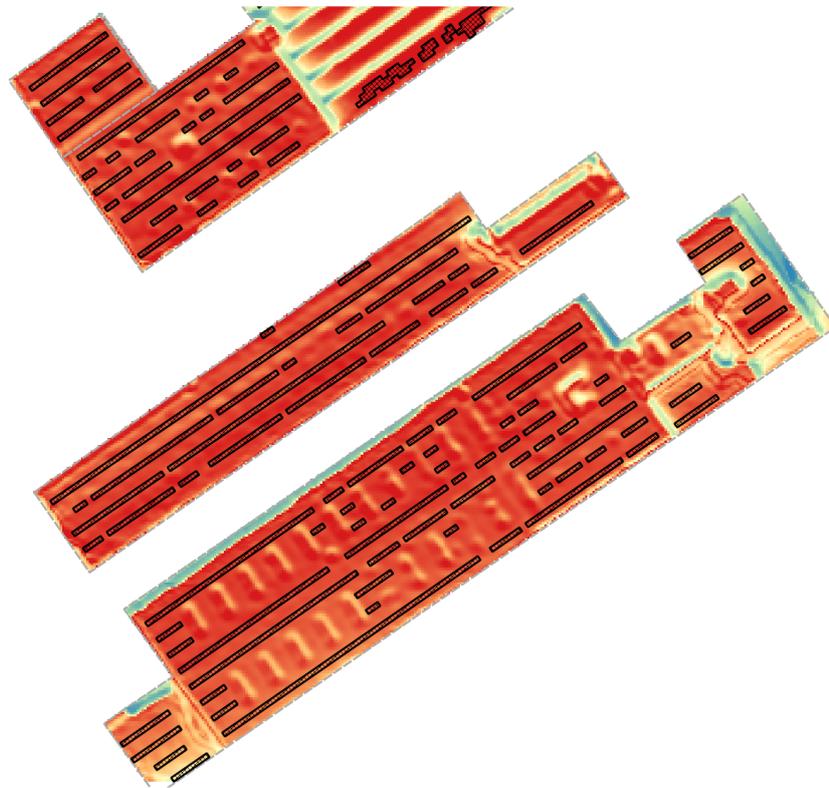
Inclinaison majoritaire



Surface de panneaux (m²)
par secteur d'orientation (°)



Surface de panneaux (m²)
par inclinaison (°)



100 à 1200 kWh/m²



Positionnement des panneaux et gisement solaire disponible

Entrepôts

Rue Victor Hugo,
Ivry-sur-Seine

 **7 350 m²**
Surface de toiture
projetée

 **9 530 MWh**
Gisement théorique
disponible

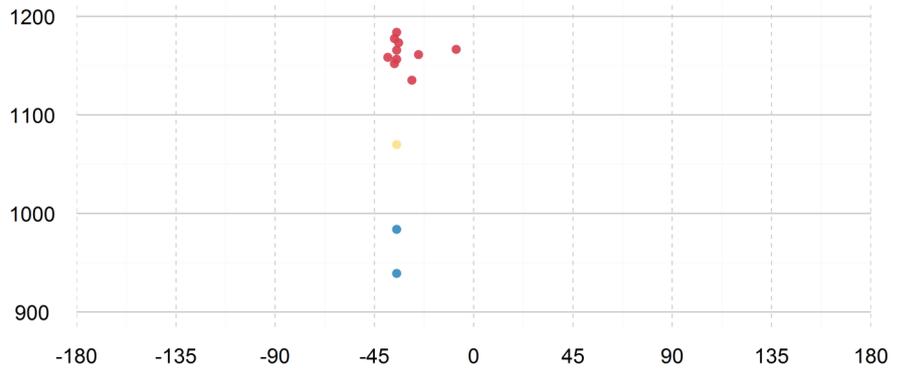
Solaire photovoltaïque

**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**

 **218 kWc**
Puissance installable

 **249 MWh_{elec}/an**
Energie produite
annuellement

 **1140 kWh_{elec}/kWc**
Rendement

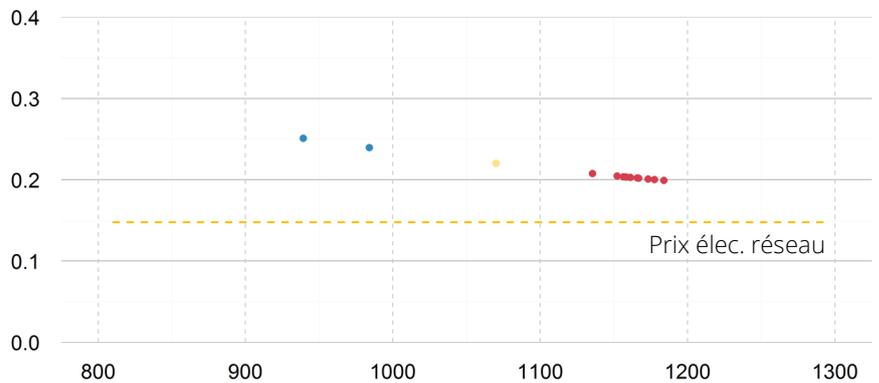


**Rendement des installations (kWh_{elec}/kWc)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

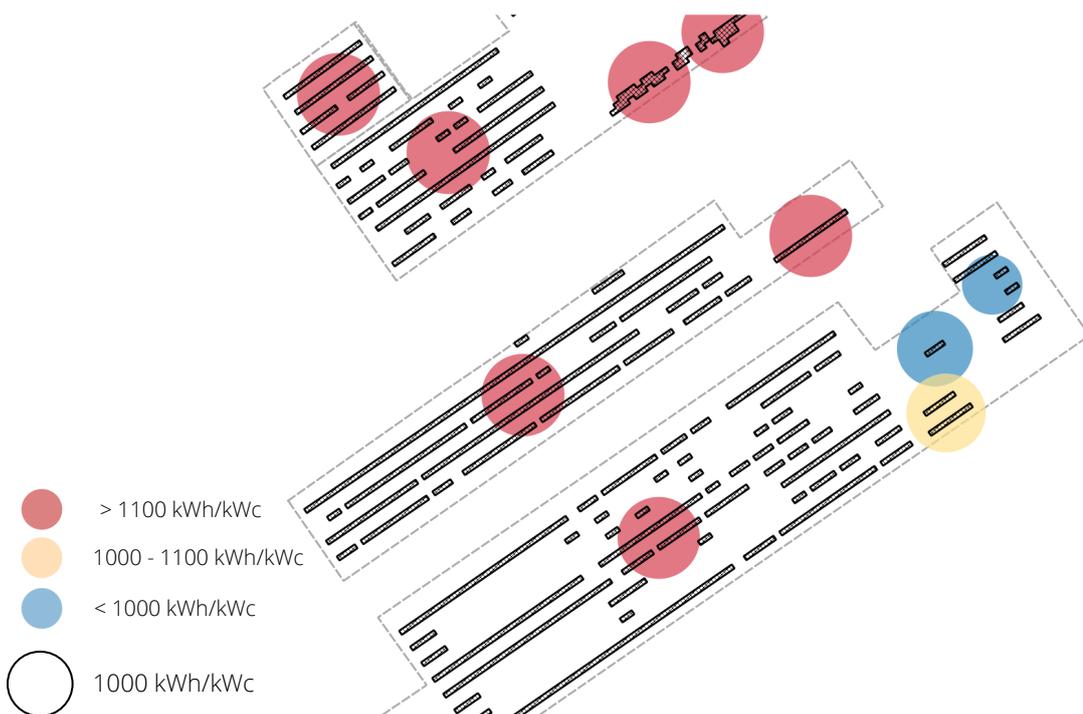
Couverture des usages :

 **7 000 m²_{SU}**
Surface utile
estimée

 **36 kWh_{elec}/m²_{SU}**
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{elec}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



Rendement des installations
Energie produite / Puissance installée, kWh_{elec}/kWc

Entrepôts

Rue Victor Hugo,
Ivry-sur-Seine

 **7 350** m²
Surface de toiture
projetée

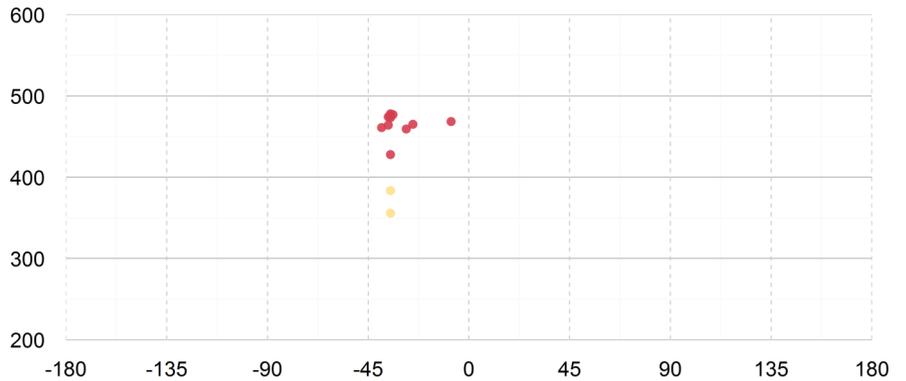
 **9 530** MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire thermique

**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**

 **670** MWh_{th}/an
Energie produite
annuellement

 **460** kWh_{th}/m²/an
Rendement

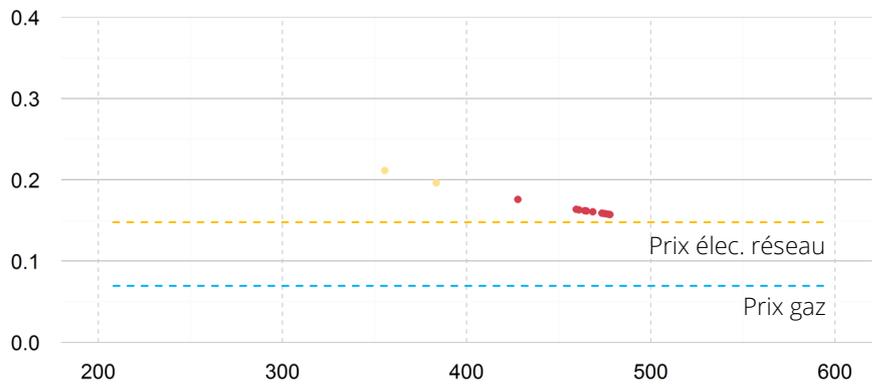


**Rendement des installations (kWh_{th}/m²)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

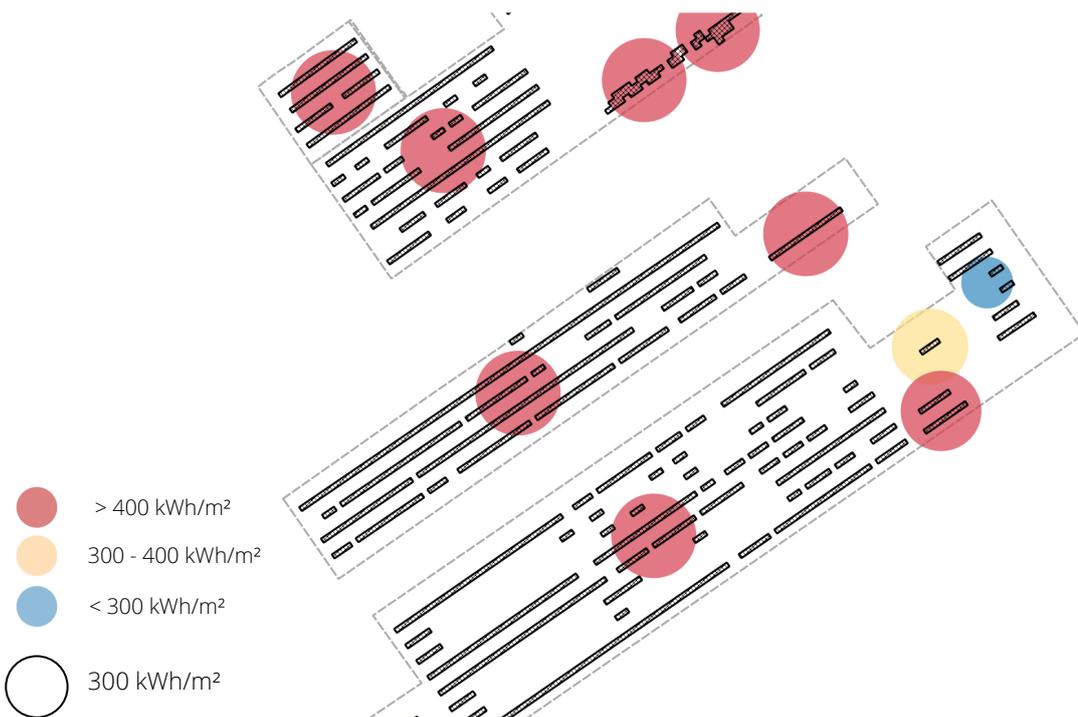
Couverture des usages :

 **7 000** m²_{SU}
Surface utile
estimée

 **96** kWh_{th}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{th}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



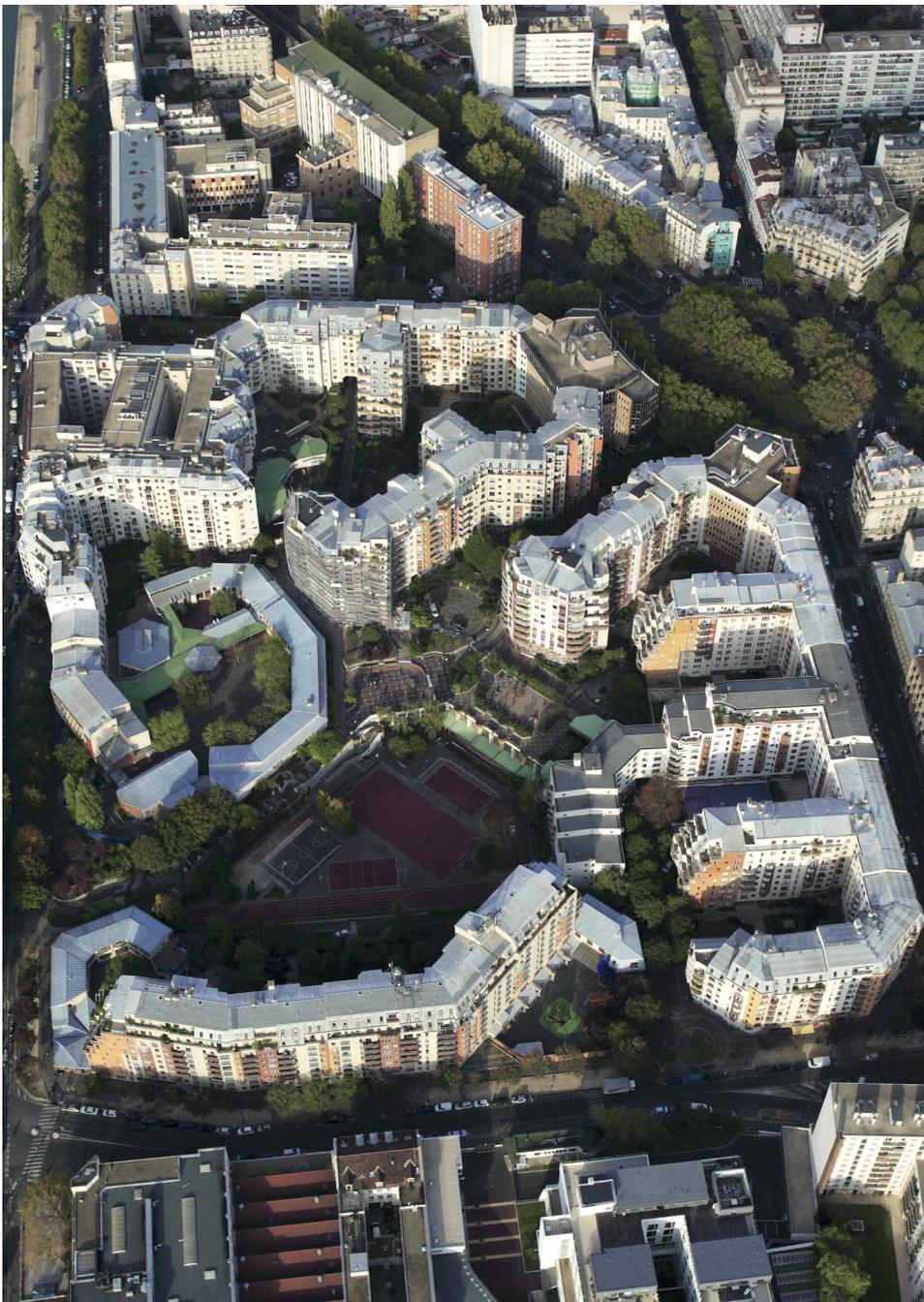
Rendement des installations
Energie produite / Surface installée, kWh_{th}/m²

Z.A.C.

Place du Colonel Fabien,
Paris X^{ème}

Les toitures de cette typologie ont la particularité d'être à deux pans mais d'une inclinaison faible, de 5 à 15°, proche donc d'une toiture terrasse.

L'orientation des bâtiments est assez irrégulière, ce que l'on retrouve dans les orientations des systèmes qui couvrent tous les secteurs angulaires.





Positionnement des systèmes en toiture

Caractéristiques des installations :



77

Nombre d'installations
possibles



1300 m² (proj. : 1270 m²)
11% de la toiture
Surface de panneaux



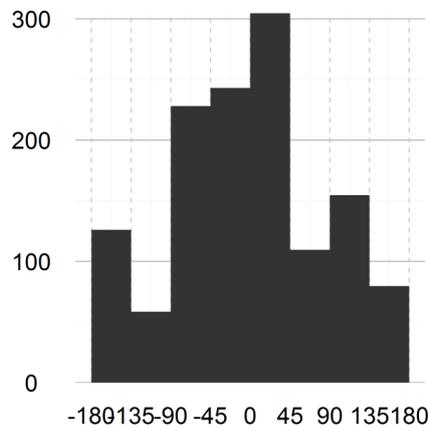
Sud + Sud Est

Orientation majoritaire

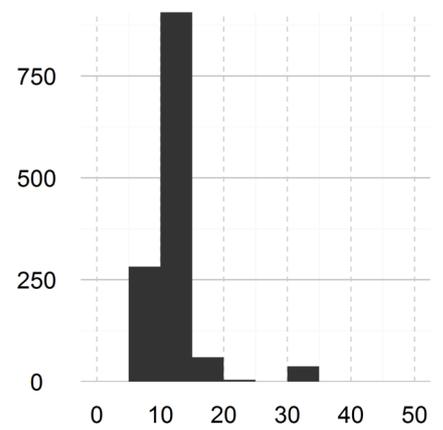


5 - 15 °

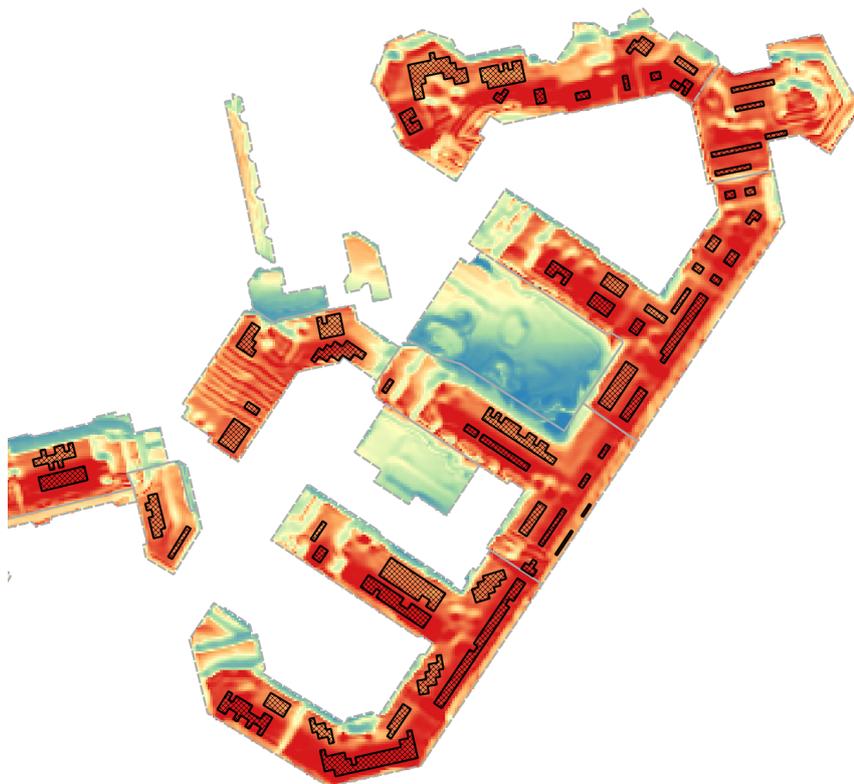
Inclinaison majoritaire



Surface de panneaux (m²)
par secteur d'orientation (°)



Surface de panneaux (m²)
par inclinaison (°)



100 à 1200 kWh/m²



Positionnement des panneaux et gisement solaire disponible

Z.A.C.

Place du Colonel Fabien,
Paris X^{ème}



11 090 m²
Surface de toiture
projetée



6 420 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire photovoltaïque

**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



196 kWc
Puissance installable



211 MWh_{elec}/an
Energie produite
annuellement



1080 kWh_{elec}/kWc
Rendement

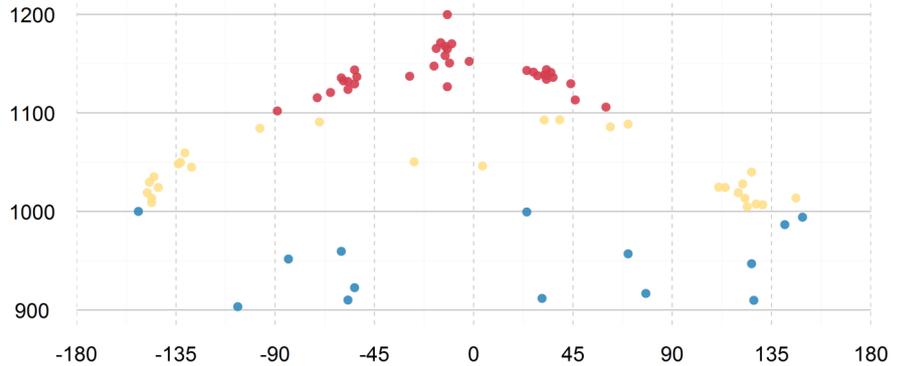
Couverture des usages :



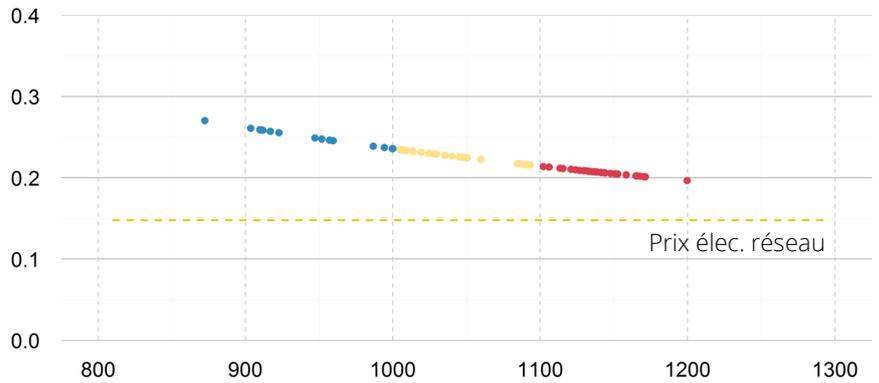
89 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



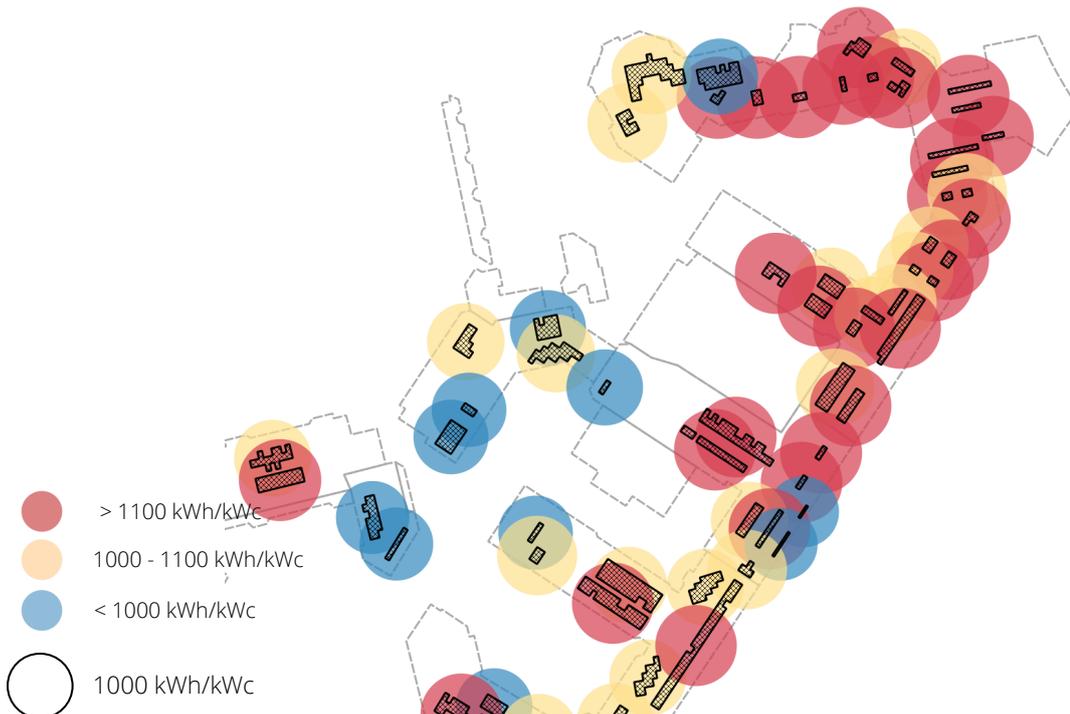
2.4 kWh_{elec}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**Rendement des installations (kWh_{elec}/kWc)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**



**LCOE (€/kWh_{elec}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



Rendement des installations

Energie produite / Puissance installée, kWh_{elec}/kWc



Solaire thermique

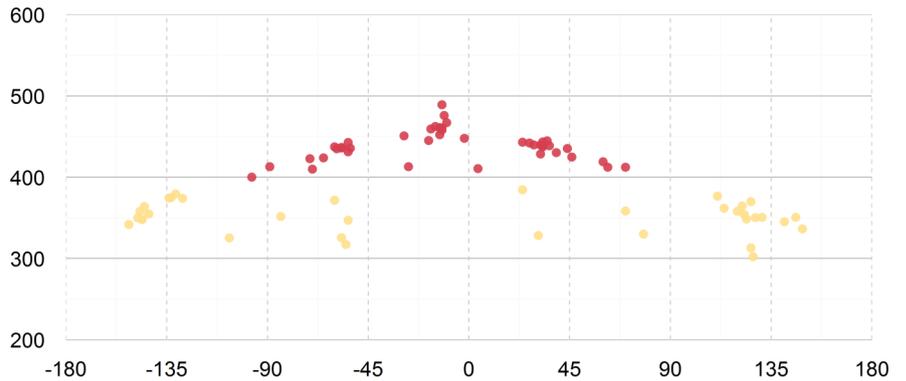
**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



529 MWh_{th}/an
Energie produite
annuellement



410 kWh_{th}/m²/an
Rendement



**Rendement des installations (kWh_{th}/m²)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

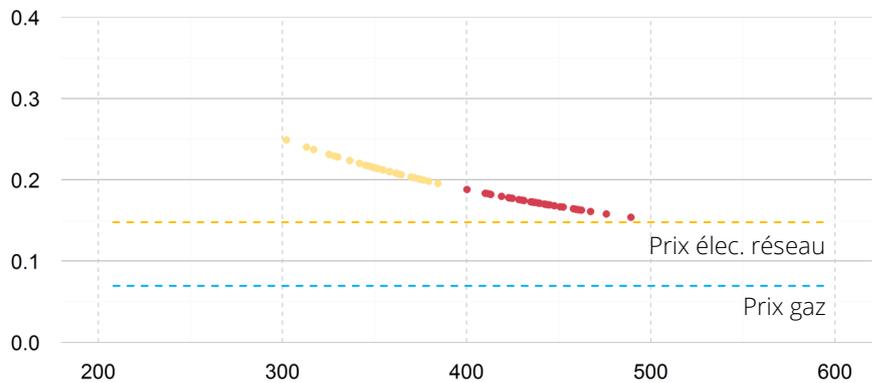
Couverture des usages :



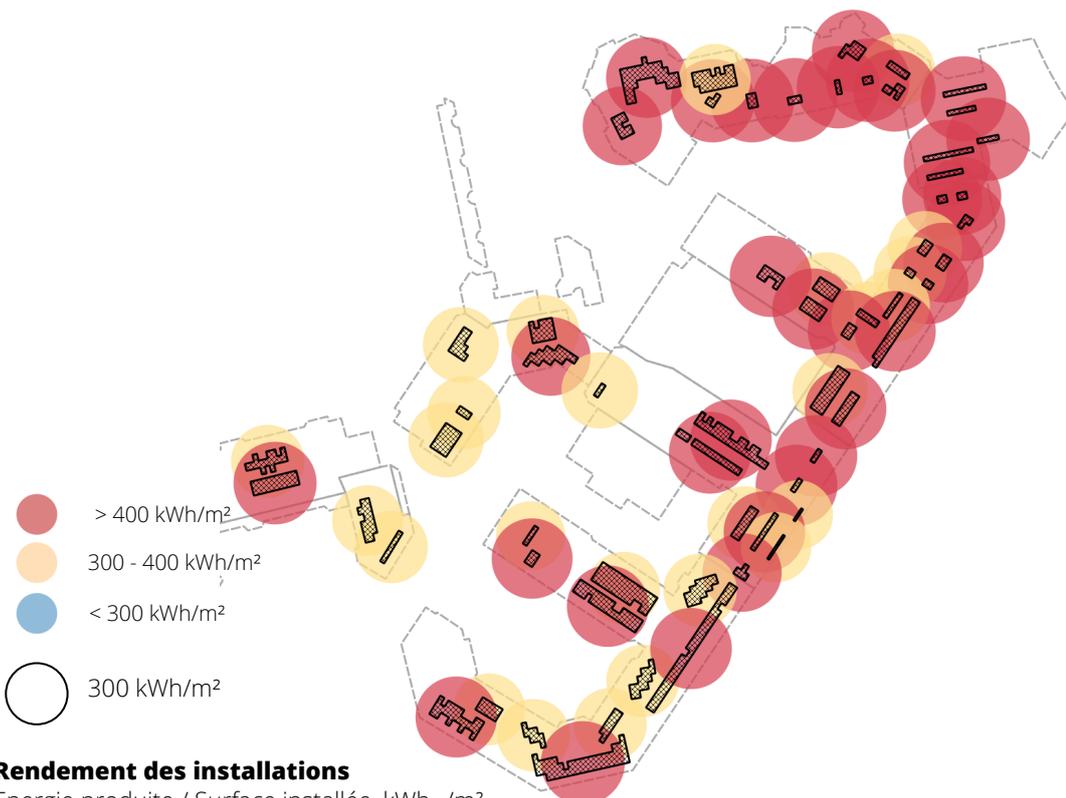
89 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



5.9 kWh_{th}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{th}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



Rendement des installations
Energie produite / Surface installée, kWh_{th}/m²

Pavillonnaire

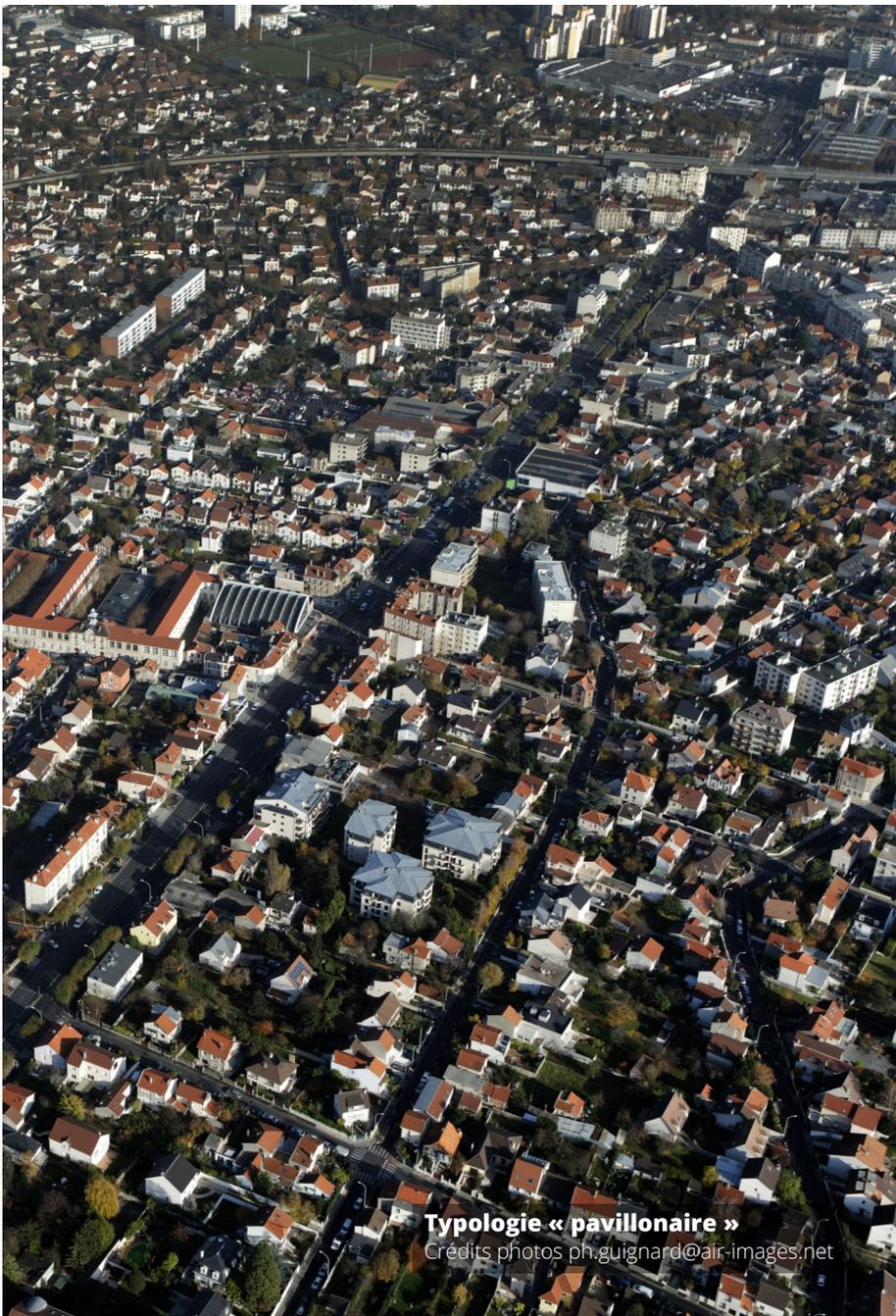
Avenue du 8 mai 1945,
Perreux-sur-Marne



21 450 m²
Surface de toiture
projetée

La typologie « pavillonnaire » comporte à la fois des toitures à 4 pans, à 2 pans, ainsi que quelques toitures plates.

L'alignement des bâtiments avec les voiries donne des toitures quasiment alignées avec les points cardinaux et donc des installations orientées surtout Est, Sud ou Ouest. De nombreux arbres aussi hauts que les bâtiments limitent le rayonnement incident sur de nombreuses toitures.



Typologie « pavillonnaire »
Crédits photos ph.guignard@air-images.net

Pavillonnaire

Avenue du 8 mai 1945,
Perreux-sur-Marne



21 450 m²
Surface de toiture
projetée



11 670 MWh
Gisement théorique
disponible

Positionnement des systèmes en toiture

Caractéristiques des installations :



189

Nombre d'installations
possibles



2390 m² (proj. : 2140 m²)
10% de la toiture
Surface de panneaux



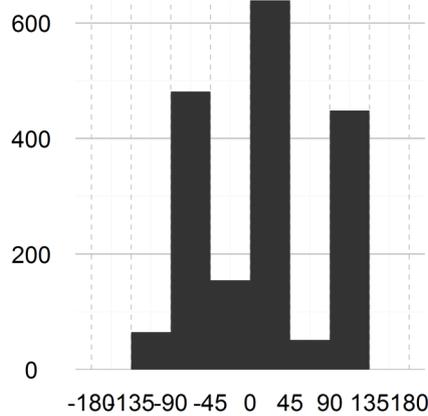
Sud + Sud Ouest

Orientations majoritaires

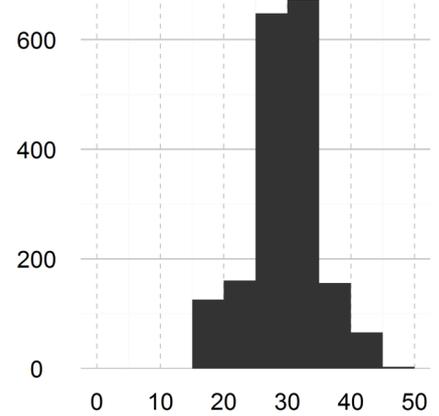


25 - 35 °

Inclinaison majoritaire



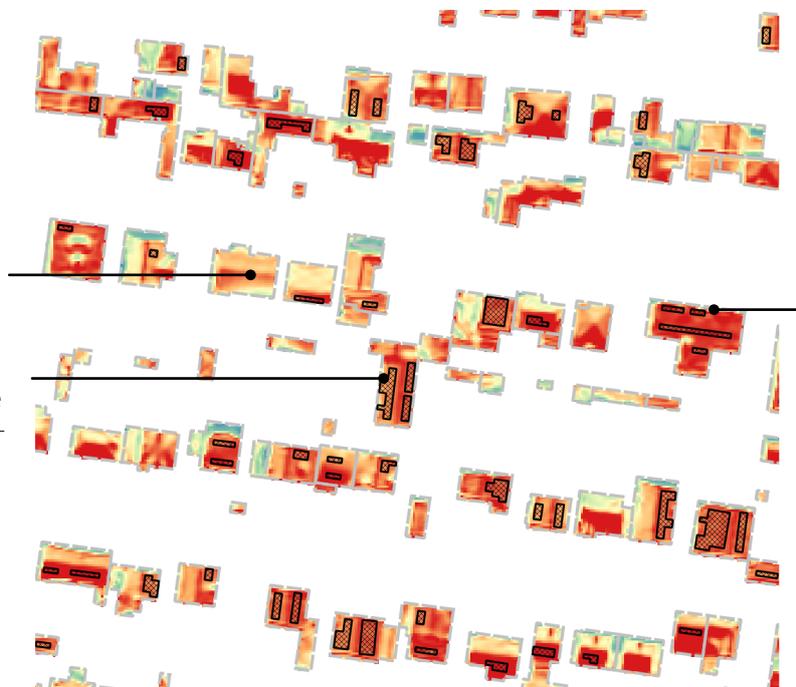
Surface de panneaux (m²)
par secteur d'orientation (°)



Surface de panneaux (m²)
par inclinaison (°)

La présence de masques limite le gisement disponible sur de nombreuses toitures.

L'orientation majoritaire des toitures à la française suit quasiment l'axe Nord-Sud : les panneaux sont donc majoritairement orientés Ouest et Est.



Les toitures plates sont équipées de panneaux inclinés positionnés en rangées, espacées de 2.6 m.

100 à 1200 kWh/m²



Positionnement des panneaux et gisement solaire disponible

Pavillonnaire

Avenue du 8 mai 1945,
Perreux-sur-Marne



21 450 m²
Surface de toiture
projetée



11 670 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire photovoltaïque

**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



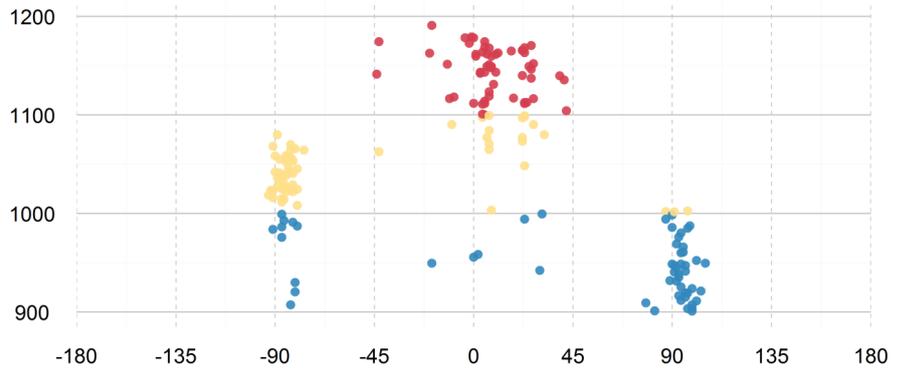
358 kWc
Puissance installable



378 MWh_{elec}/an
Energie produite
annuellement



1060 kWh_{elec}/kWc
Rendement



**Rendement des installations (kWh_{elec}/kWc)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

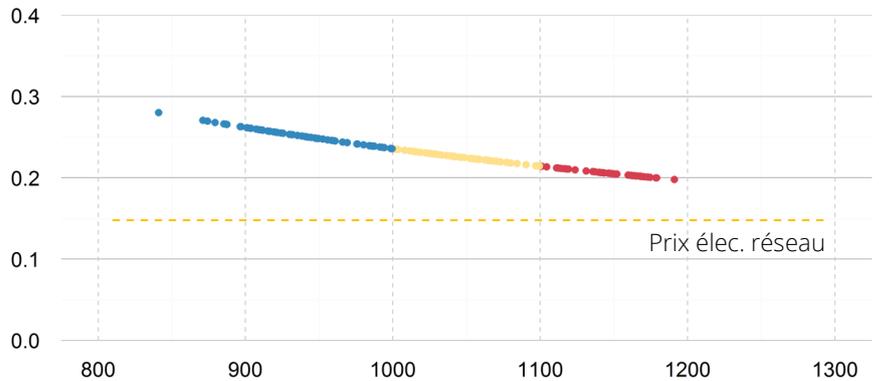
Couverture des usages :



38 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée

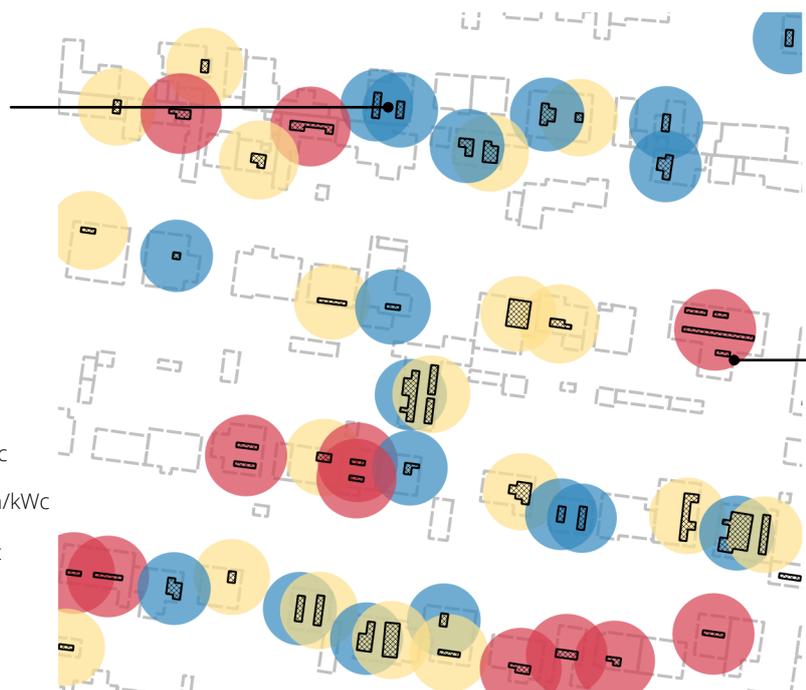


9.9 kWh_{elec}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{elec}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**

Les toitures à la française donnant des systèmes Est Ouest obtiennent des rendements aux alentours des 900 - 1000 kWh/kWc.



Les toitures terrasses permettent d'obtenir des rendements proches du maximum théorique à Paris, environ 1200 kWh/kWc.

Rendement des installations

Energie produite / Puissance installée, kWh_{elec}/kWc

Pavillonnaire

Avenue du 8 mai 1945,
Perreux-sur-Marne



21 450 m²
Surface de toiture
projetée



11 670 MWh
Gisement théorique
disponible

Solaire thermique

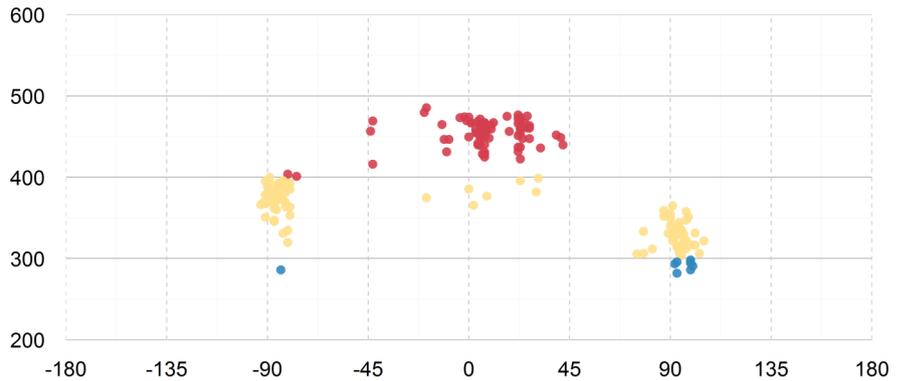
**Installations au gisement
supérieur à 800 kWh/m²/an :**



954 MWh_{th}/an
Energie produite
annuellement



400 kWh_{th}/m²/an
Rendement



**Rendement des installations (kWh_{th}/m²)
par orientation (-90° = Est, 0° = Sud, +90° = Ouest)**

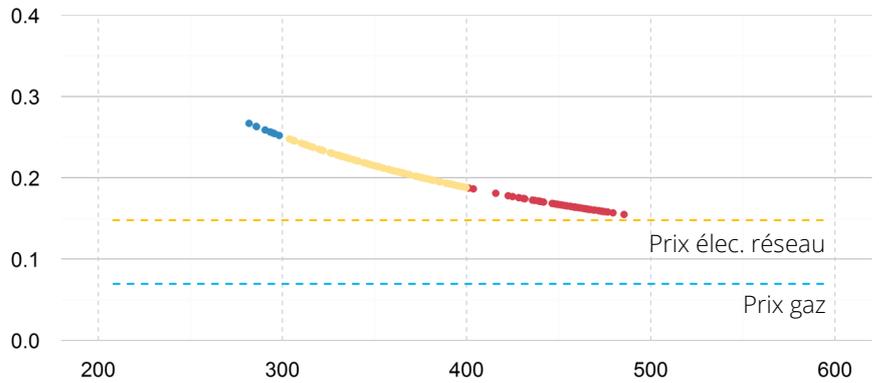
Couverture des usages :



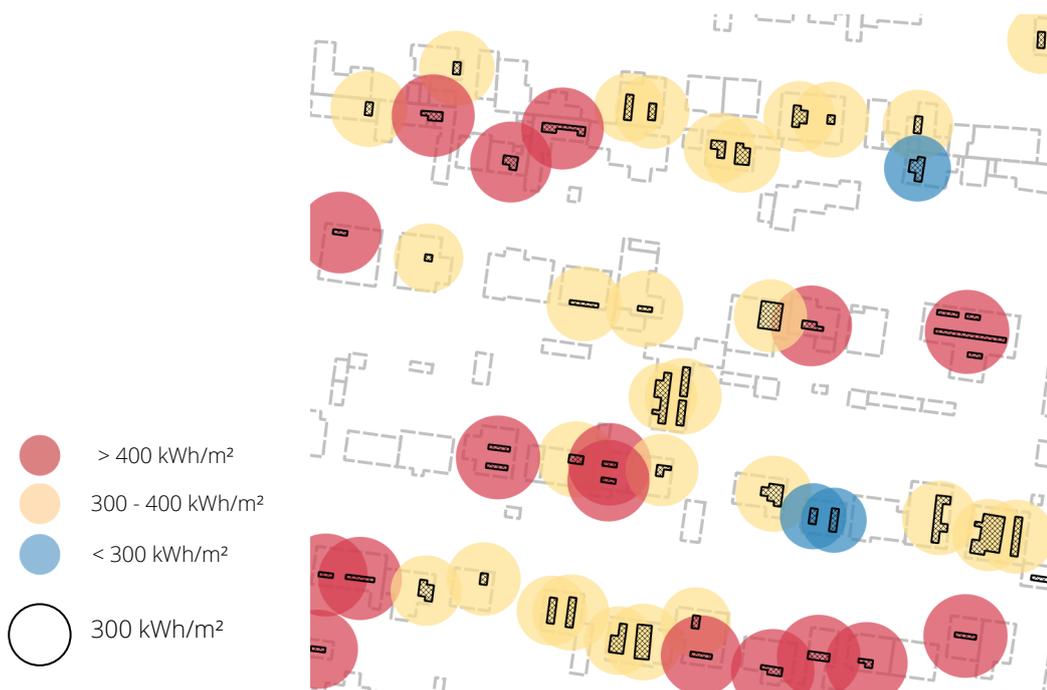
38 000 m²_{SU}
Surface utile
estimée



25 kWh_{th}/m²_{SU}
Energie produite
annuellement



**LCOE (€/kWh_{th}) en fonction
du rendement (kWh/m²)**



Rendement des installations

Energie produite / Surface installée, kWh_{th}/m²

Analyse de potentiel solaire - Toitures du Grand Paris

Bilan des résultats

Quelles contraintes d'intégration pour les panneaux?

L'étude des 8 typologies de tissu révèle des niveaux de contrainte à l'intégration de panneaux solaires différents dans le cadre des règles d'implantation actuelles : quand la surface exploitable des toits du Marais n'est que de 3 %, elle dépasse les 15 % pour les entrepôts (se rapprochant ainsi du maximum théorique d'environ 20 - 25 % pour une toiture plate complètement dégagée).

Quelles implications à l'échelle du territoire ?

Les chiffres propres à chaque tissu pourraient être extrapolés à l'ensemble du territoire du Grand Paris, à partir d'une affectation de chaque bâtiment construit à l'une des typologies étudiées (par similarité des morphologies et des période de construction par exemple).

Lorsque le cadastre solaire de la ville de Paris a été produit en 2013, il avait été estimé que 3 à 4 % de la surface de toiture pouvait être équipée en panneaux solaires, soit 1.2 millions de m². Une application des résultats de l'étude présente, en extrapolant à la ville de Paris uniquement par rapprochement avec les dates de construction, montre un potentiel presque deux fois plus grand, à 2.1 millions de m² (soit 6 à 7 %). Ce résultat s'explique notamment par la forte présence du tissu haussmannien dans la ville et de ses 9 % de surface de toiture exploitable.

Il convient de noter que les résultats sont obtenus dans le cadre de contraintes d'implantation importantes : quel serait le potentiel libéré par le recours à des panneaux surélevés en toiture, par exemple ?

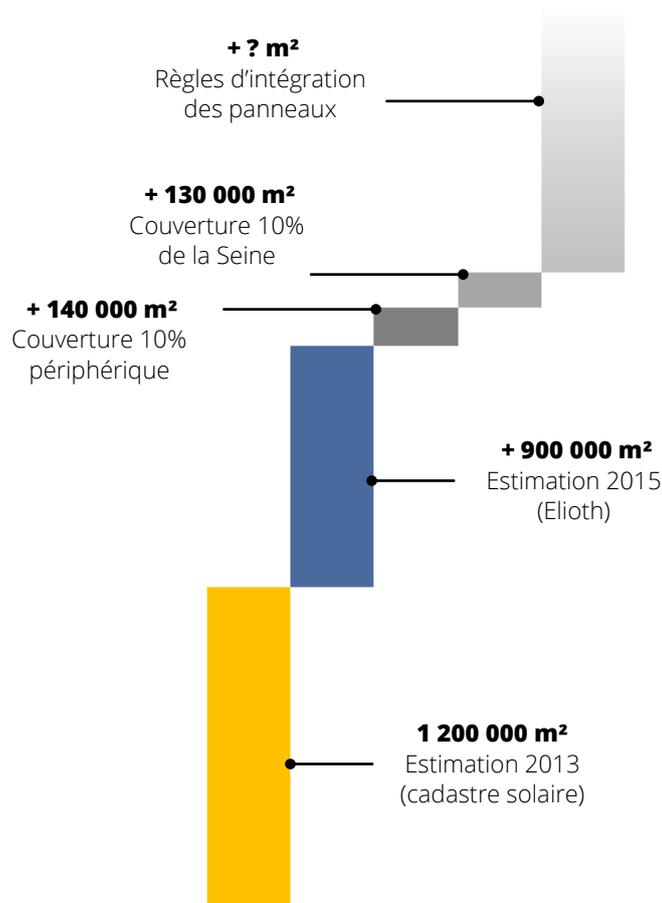
Les résultats ne représentent enfin que le potentiel de solarisation des toitures, mais le potentiel des infrastructures pourrait également être étudié : couvrir 10% des voies du périphérique ajouterait 140 000 m² de panneaux, couvrir 10% de la Seine de barges flottantes ajouterait encore plus de 100 000 m² ...

Quels rendements techniques et financiers ?

Les rendements moyens sont quasiment tous supérieurs à 1000 kWh/kWc pour le photovoltaïque et à 400 kWh/m² pour le thermique. Les installations atteindront donc la compétitivité avec le réseau dans les années à venir, sous l'effet conjugué de la baisse du prix des systèmes et de l'augmentation attendue des prix (notamment ceux de l'électricité).

Vers l'autoproduction de l'énergie en ville ?

L'adéquation production / consommation est esquissée dans cette étude par le biais d'un ratio d'énergie produite par mètre carré de surface utile des bâtiments : les résultats obtenus montrent la difficulté de faire progresser actuellement les tissus très denses vers plus d'autoproduction, à consommation égale.



Potentiel solaire de la ville de Paris

Surfaces mobilisables (m²)

Analyse de potentiel solaire - Toitures du Grand Paris

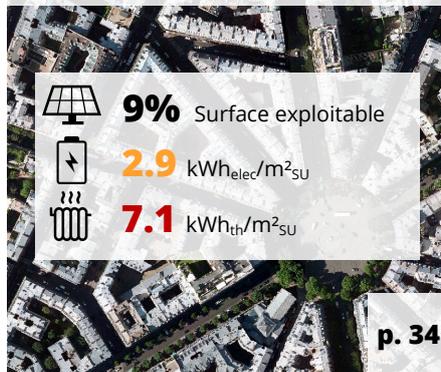
Bilan des résultats

Les 8 typologies étudiées

Les principaux résultats de l'étude sont résumés ci contre : surface exploitable, rendements moyens et production énergétique par mètre carré de surface utile.

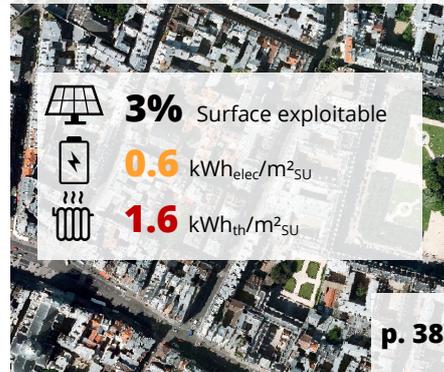
Haussmannien

Place Victor Hugo,
Paris XVI^{ème}



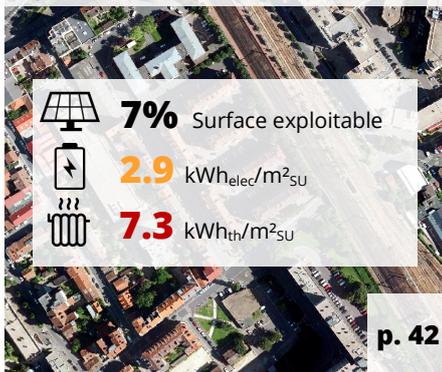
Marais

Place du Marché Sainte Catherine,
Paris IV^{ème}



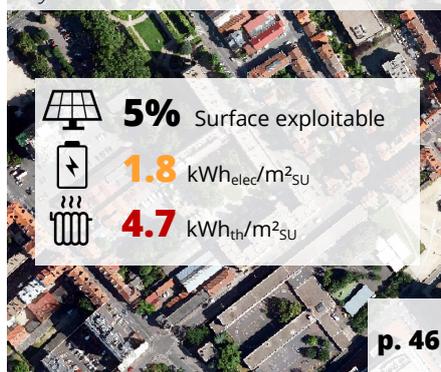
Immeuble - 1950

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



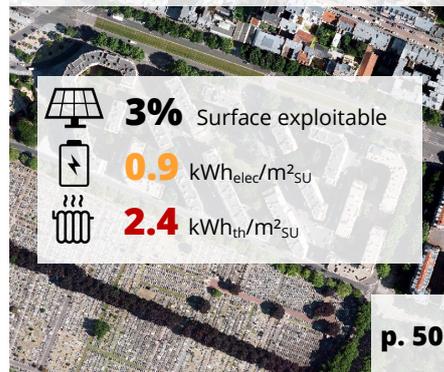
Immeuble - 1970

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



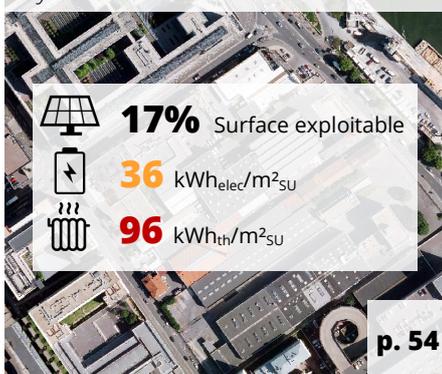
H.B.M.

Place de la porte de Chatillon,
Paris XIV^{ème}



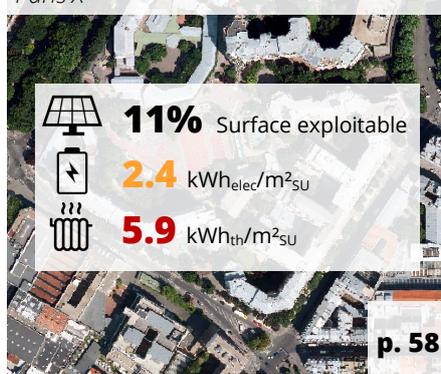
Entrepôts

Rue Victor Hugo,
Ivry-sur-Seine



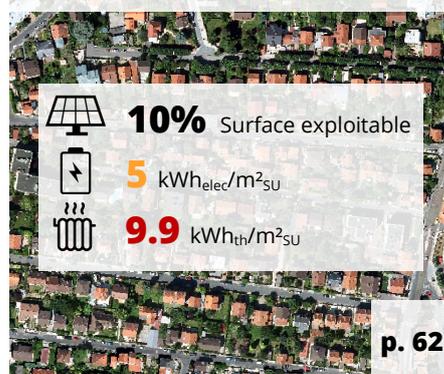
Z.A.C.

Place du Colonel Fabien,
Paris X^{ème}



Pavillonnaire

Avenue du 8 mai 1945,
Perreux-sur-Marne



Analyse de potentiel solaire - Toitures du Grand Paris

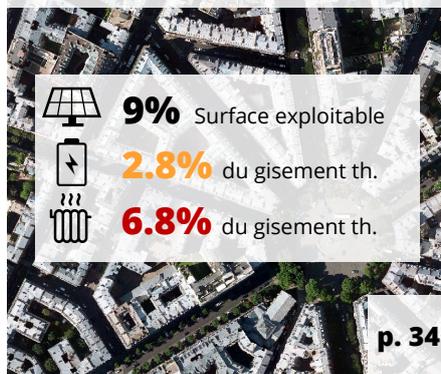
Bilan des résultats

Les 8 typologies étudiées

La surface exploitable et la part exploitable du gisement théorique (énergie totale disponible sur les surfaces de toiture recevant plus de 800 kWh/m²) sont présentés ci-contre.

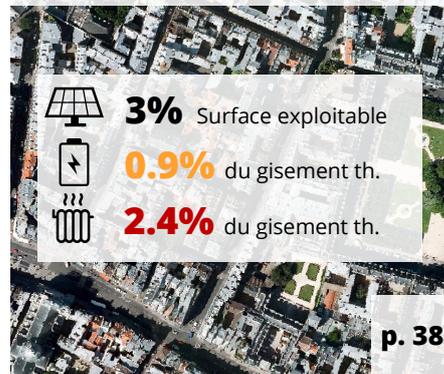
Haussmannien

Place Victor Hugo,
Paris XVI^{ème}



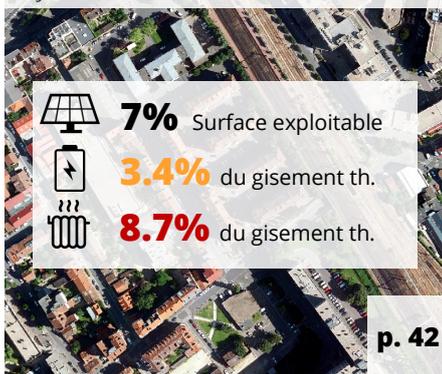
Marais

Place du Marché Sainte Catherine,
Paris IV^{ème}



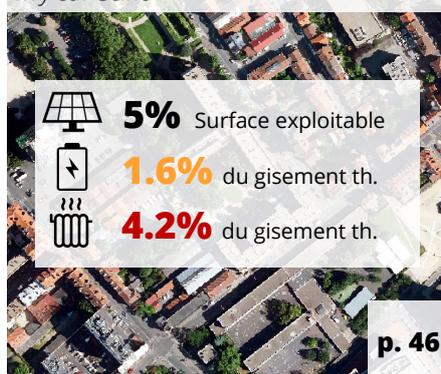
Immeuble - 1950

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



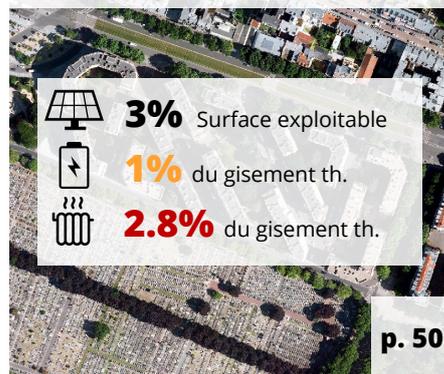
Immeuble - 1970

Rue Saint Just,
Ivry-sur-Seine



H.B.M.

Place de la porte de Chatillon,
Paris XIV^{ème}



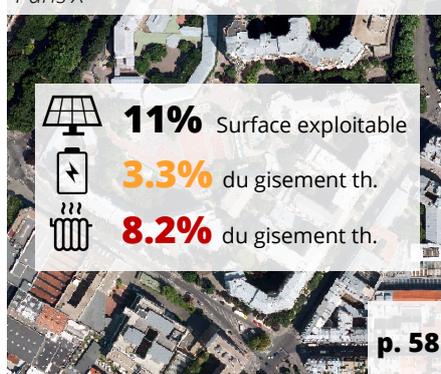
Entrepôts

Rue Victor Hugo,
Ivry-sur-Seine



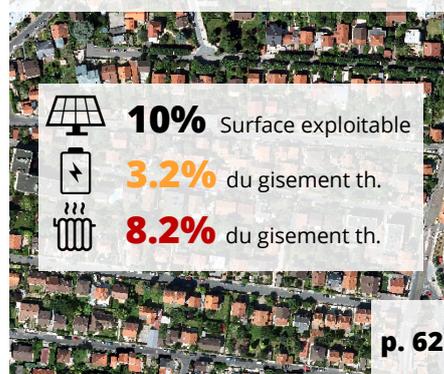
Z.A.C.

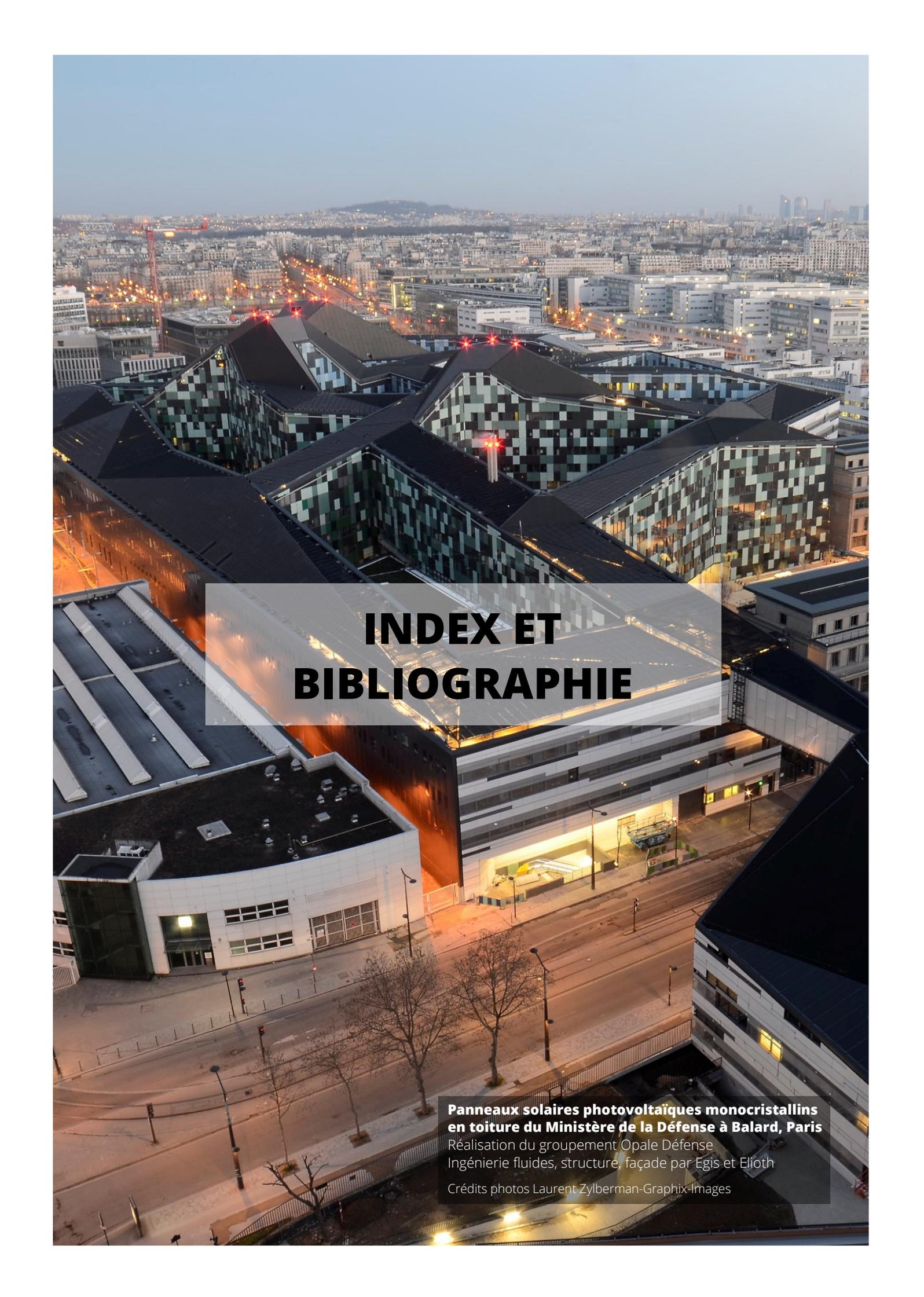
Place du Colonel Fabien,
Paris X^{ème}



Pavillonnaire

Avenue du 8 mai 1945,
Perreux-sur-Marne





INDEX ET BIBLIOGRAPHIE

**Panneaux solaires photovoltaïques monocristallins
en toiture du Ministère de la Défense à Balard, Paris**

Réalisation du groupement Opale Défense
Ingénierie fluides, structure, façade par Egis et Elioth

Crédits photos Laurent Zylberman-Graphix-Images

Index

Solaire photovoltaïque

Panneaux mono-cristallins, poly-cristallins, à couche mince, amorphe.....	4
Rendement des panneaux.....	4
Analyse de cycle de vie du kWh produit	5
Temps de retour énergétique des panneaux	5
Levelized Cost Of Energy du photovoltaïque.....	6
Parité réseau	6
Tarifs d'achats garantis par l'État	7
Intégration Au Bâti / Intégration Simplifiée au Bâti	7
Autoconsommation et autoproduction	8
Stockage d'électricité sous forme chimique	9
Stockage d'électricité sous forme de chaleur	10

Solaire thermique

Panneaux à tubes sous vide, plans vitrés, à concentration	11
Boucle solaire.....	11
Rendement des panneaux.....	12
Levelized Cost Of Energy du solaire thermique.....	13
Surchauffe estivale.....	14

Intégration au milieu urbain

Ilot de chaleur urbain et panneaux solaires	17
Règles d'implantation des panneaux à Paris	18
Impact des masques proches.....	19
Végétalisation et panneaux solaires	20
Surchauffe estivale.....	14

Bibliographie

Fraunhofer ISE (2015):

Current and Future Cost of Photovoltaics.

Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems.

Study on behalf of Agora Energiewende.5/6

ADEME (2015):

Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre.

Electricité - 2014 - Mix moyen. 5

Syndicat des Energies Renouvelables (2013):

Anticiper le développement du solaire photovoltaïque compétitif

.....6/8

Björn Nykvist & Måns Nilsson, in Nature Climate Change (2015):

Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles 7

RTE (2015):

Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France 2014 13

Masson et al., in Frontiers in Environmental Science (2014):

Solar panels reduce both global warming and urban heat island 17

Mairie de Paris (2014):

Habiter Durable - Panneaux Solaires 18

Oscar Perpiñán, in Journal of Statistical Software (2012):

solar: Solar Radiation and Photovoltaic Systems with R..... 22

D. C. Jordan et S. R. Kurtz, in Progress in Photovoltaics: Research and Applications (2012):

Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review 26

Analyse de potentiel solaire

Toitures du Grand Paris



Etude réalisée par Elioth (dénomination juridique Egis Concept)
Septembre 2015

Tous droits réservés.

Conception, rédaction, mise en page

Direction de l'étude : Raphaël Ménard

Chef de projet : Felix Pouchain

Stagiaire : Estelle Rabiller

Site web et publications



elioth.com



issuu.com/elioth_groupeegis

Contact



elioth@elioth.fr



[@elioth](https://twitter.com/elioth)



[elioth](https://www.linkedin.com/company/elioth)