



HAL
open science

Prospective pour une capitale économe - TEPOS, équipements publics et cartographie et typologie des gisements énergétiques à Paris

Philippe Villien

► To cite this version:

Philippe Villien. Prospective pour une capitale économe - TEPOS, équipements publics et cartographie et typologie des gisements énergétiques à Paris : Rendu final de la recherche “ Histoire et Prospective pour une capitale économe ” - HPCE - Volume 2 Du BEPOS au TEPOS - L'architecture des équipements publics parisiens en prise avec la production des ENR locales, de la ville à l'îlot et au bâtiment. Ministère de la Culture - BRAUP. Ignis Mutat Res, Des profondeurs des caves à la canopée : histoire et prospectives des politiques énergétiques d'une capitale économe 1770-2050, 2014. hal-04070192

HAL Id: hal-04070192

<https://hal.science/hal-04070192>

Submitted on 18 Apr 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Histoire
et Prospective
pour une Capitale
Économique

Rapport final

DES PROFONDEURS DES CAVES À LA CANOPÉE

HISTOIRE ET PROSPECTIVES DES POLITIQUES ÉNERGÉTIQUES
D'UNE CAPITALE ÉCONOMIQUE 1770-2050

IPRAUS - UMR AUSSER - CNRS 3329

Institutions et équipe de recherche HPCE

Institutions

Bureau de la recherche architecturale et urbaine, Ministère de la Culture

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie

Atelier International du Grand Paris

Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Belleville, laboratoire IPRAUS, UMR AUSser (CNRS 3329)

Conservatoire National des Arts et Métiers

Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris

Ville de Paris, direction de l'Urbanisme

TH1 Philippe Villien architecture

Equipe de recherche

Responsable scientifique :
Emmanuelle Gallo

Equipe pluridisciplinaire :
Morgane Colombert, Youssef Diaf, Mathieu Fernandez, Vanessa Fernandez, André Guillaume, Linnéa Rollenhagen-Tilly, Philippe Villien, Samaher Wannous

Stagiaires (IPRAUS et TH1 Villien) :
Elsa Besson, Benjamin Ciardi, Vincent Delac, Riham Etagamal, Loïc Gilbert, Katarina Mijic, Mickael Sandrin, Julien Vincent

Conception graphique

Bruno Demelin

Nous remercions la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain ainsi que François Chatillon, Sabine Barles et Eunhye Kim



Sommaire

Volume I

Page 5

Introduction

Page 9

Diagnostic de performance énergétique

Page 19

Etudes de cas bâtiments

Palais de la Bourse
Conservatoire National des Arts et Métiers
Hôpital Lariboisière
Les piscines
Cité de Refuge de l'Armée du Salut
Centre Georges Pompidou
Musée d'Orsay
Institut du Monde Arabe
Ecole Wattignies

Page 175

Notions sur l'énergie

Page 185

Conclusion

Page 189

Annexes & bibliographies

Volume II

Page 1

Prospective

Modalités de la prospective en rapport avec l'approche historique

Prospective à l'échelle XL : région Île-de-France

Prospective à l'échelle L : ville de Paris

Prospective à l'échelle M : les îlots TEPOS

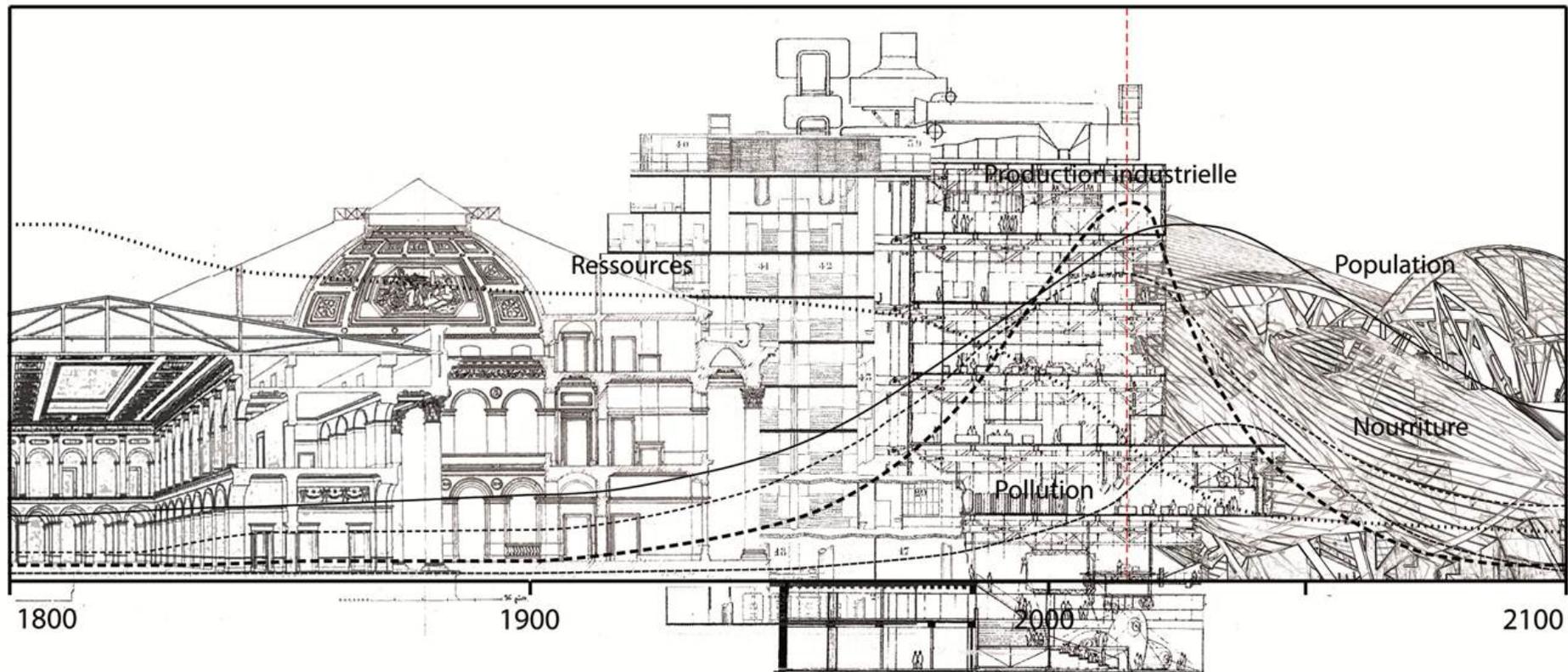
Prospective à l'échelle S : les édifices BEPOS



PROSPECTIVE

illustration 01 Une perspective architecturale dans une vision hybride. Frise chrono-morphologique : lien entre les dynamiques globales et les formes architecturales.¹

1 Collage réalisé par TH1 Villien avec une courbe prospective de D. Meadows, J. Randers, « Les limites à la croissance » .



« *Prospective pour une capitale économe* »

Rendu final de la recherche « Histoire et Prospective pour une capitale économe » - HPCE

3. PROSPECTIVE À L'ÉCHELLE L : VILLE DE PARIS

page 26

3.1 Cartographie de l'énergie

page 26

3.2 Atlas des gisements énergétiques parisiens

page 31

3.3 Nous sommes pour la constitution d'atlas de gisements énergétiques dans les territoires, en général et en particulier dans les métropoles urbaines.

page 31

3.4 Typologie territorialisée des gisements énergétiques à partir de la coupe territoriale

page 55

3.5 Les 3 types de gisements énergétiques : les diffus, les poches et les flux

page 57

4. PROSPECTIVE À L'ÉCHELLE M : LES ILOTS TEPOS

page 68

5.1 Les DPE comme première évaluation de départ pour la prospective.

page 69

5. PROSPECTIVE À L'ÉCHELLE S - LES ÉDIFICES BEPOS

page 74

5.1 Prospective sur le Centre Georges Pompidou

page 76

5.2 Prospective sur l'Institut du Monde Arabe

page 86

5.3 Prospective sur la piscine des Amiraux

page 98

Ce rapport expose les résultats définitifs de la recherche.

1. MODALITÉS DE LA PROSPECTIVE EN RAPPORT AVEC L'APPROCHE HISTORIQUE

Relations entre les édifices patrimoniaux et la réflexion prospective

1.1 Organisation de l'équipe pour les études prospectives

Philippe Villien – architecte urbaniste – enseignant chercheur à l'Ipraus et dirigeant de TH1 Villien a conçu et piloté la partie prospective de la recherche HPCE. Les images et les recherches documentaires pour cette partie ont été produites par Elsa Besson, Benjamin Ciardi, Riham Elgamal, Katarina Mijic, Mickael Sandrin, Julien Vincent - architectes à TH1 VILLIEN. Cette recherche doit beaucoup à l'investissement intellectuel de Mickael Sandrin, architecte à TH1 Villien.

1.2 Tisser des liens entre les méthodologies historique et prospective

Nous souhaitons lier l'histoire et la prospective par différentes méthodes. Bien entendu les outils graphiques sont mobilisés pour associer les 2 approches. Mais des contenus apparentés permettent de croiser les regards et les objectifs historique et prospectif. Pour cela plusieurs axes de mise en relation ont été développés dans la durée de la recherche HPCE.

Il s'agit de trois outils : ceux de la cartographie, le « re dessin » pour élaborer l'ensemble des coupes énergétiques et enfin l'exploitation des DPE historiques (Diagnostic de Performance Énergétique).

Mais un autre axe de réflexion est également actif pour ancrer notre prospective dans des connaissances historiques : nous soulignerons rapidement les liens entre nos prospectives et les visions des utopies énergétiques des années 70.

La cartographie énergétique comme culture commune à l'histoire et à la prospective

En tout premier lieu un travail sur les archives a été fait par les « prospectivistes » de la recherche HPCE, avec l'aide des historiens de l'équipe.

Il s'agissait de nourrir nos hypothèses par une brève immersion dans certains fonds d'archives spécifiques. Nous avons ainsi effectué quelques « sondages » dans les archives détaillant des énergies diverses, sur les conseils avisés des historiens.

Cela nous permet de nous constituer une vision précise de la cartographie énergétique élaborée au fil des 2 derniers siècles à Paris. Aucun atlas dédié aux aspects énergétiques sur une longue durée n'a été trouvé pour Paris et sa banlieue, hormis l'important atlas « Jigaudon » de 1976 sur lequel nous reviendrons plus en détail¹.

1 Nous rendons un hommage appuyé à un atlas de référence : «Évolution de la géographie industrielle de Paris et sa proche banlieue au XIXe siècle», Centre de documen-

Les archives du service d'assainissement de la Ville de Paris ont été mises à contribution pour la cartographie des égouts, ceci afin de servir de base pour les prospectives sur la récupération de l'énergie fatale sur les eaux usées et les eaux vannes. Aux Archives de la Ville de Paris nous avons consulté des atlas sur les réseaux de Gaz et sur les cartographies des équipements publics.

Des réseaux énergétiques aujourd'hui obsolètes sont apparus plus clairement : l'univers des gazomètres intramuros, le réseau d'air comprimé sont des ensembles forts instructifs, non approfondis dans notre recherche HPCE. Il serait assurément fructueux d'étudier en détail ces réseaux obsolètes,

tation d'histoire des techniques, Conservatoire national des Arts et Métiers, 2 tomes, 1976, 617 pages accompagné d'un atlas de 55 planches réalisé par Jigaudon. Sous la direction de Maurice Daumas. Voir pour une approche succincte l'article de Gérard Jacquemet de 1978 à propos des qualités exceptionnelles cet atlas. http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ahess_0395-2649_1978_num_33_3_293947_t1_0557_0000_001 - dernière consultation 30 mars 2014.

notamment pour mieux armer l'histoire générale du « métabolisme urbain » parisien et les applications contemporaines.

Les coupes énergétiques historiques et prospectives

Afin de bien lier la composante historique et prospective par une meilleure compréhension, tous les architectes de la partie prospective ont contribué à la production des dessins de coupes énergétiques et aux carrés de repérage illustrant les chapitres historiques précédents.

Nous avons réalisé cette unification afin d'avoir une vue d'ensemble par delà la diversité des documents d'archives. Cette charte graphique unifiée permet de comparer plus aisément les cas entre eux.

Le « re-dessin » est une pratique extrêmement didactique, pourtant utilisée de moins en moins fréquemment dans l'édition d'architecture, certainement de part ses coûts élevés en main d'oeuvre.

C'est une technique pourtant fort fructueuse dans le cadre de cette recherche pour laquelle il est essentiel de créer une culture commune entre des historiens et des architectes. Les coupes énergétiques historiques sont donc les bases sur lesquelles sont figurées les hypothèses prospectives, notamment pour les cas de l'IMA, du Centre Georges Pompidou et pour la piscine des Amiraux.

Cette discipline du « re-dessin » nécessite de prendre connaissance finement du cas étudié au travers des textes des historiens, des rapports techniques basant les analyses, et bien entendu à travers les nombreux plans et coupes anciennes issus des archives. L'élaboration des fonds de coupes, leur mise à l'échelle, la vectorisation sous Autocad puis l'exportation sous Illustrator pour le traitement graphique demande de synthétiser les informations avec discernement. De nombreux aller-retour ont été effectués avec les différents chercheurs historiens, afin de faire coïncider les analyses avec les dessins. Cette unification par les coupes énergétiques s'est avérée essentielle pour faire circuler les

informations et avoir une vue d'ensemble des cas étudiés. C'est sur cette base précise et documentée que sont élaborées les hypothèses prospectives pour chacun des cas.

Exploitation des DPE historiques (Diagnostic de Performance Énergétique)

Nous avons basé notre approche à l'échelle du bâtiment sur les données des DPE historiques (Diagnostic de Performance Énergétique). Les estimations des productions et des besoins, afin d'établir les positivités potentielles aux horizons 2020 et 2050 des 3 cas d'étude approfondis, l'IMA, le Centre Georges Pompidou et la piscine des Amiraux, sont faits à partir des valeurs transmises par les DPE historiques. Ceci nous donne une base de départ relativement précise et documentée par grands types de sources énergétiques, même si les DPE ne font pas l'unanimité quant à leur mode d'établissement (cf. les réserves décrites à propos du CNAM sur les grands volumes chauffés).

1.3 Hypothèses générales liant l'histoire longue et la prospective

Certaines hypothèses développées dans les chapitres historiques de cette recherche sont directement fondatrices de celles de la partie prospective. Ainsi l'hypothèse que nous résumons par « **Paris, capitale économe** » est directement en phase avec l'hypothèse des **territoires à énergie positive**. En effet nous pouvons aisément affirmer que la positivité énergétique sera basée sur une gestion économe de l'énergie : nous pourrions synthétiser cette idée par une formule : « l'économe est globalement positif ».

Ainsi nous ne défendons pas nos élaborations prospectives comme basées essentiellement sur des ruptures techniques. L'originalité de notre recherche prise dans son ensemble consiste dans le croisement de deux idées : l'une concerne les conséquences à l'échelle du bâtiment et sur une longue durée de la **pénurie de l'énergie**, l'autre porte sur un **principe d'économie** qui est sous-jacent à tous

les choix techniques et architecturaux efficaces pour « une architecture à l'environnement bien tempérée ». Nous évoquons là bien entendu le magnifique travail de Reyner Banham « l'architecture de l'environnement bien tempéré » paru pour la première fois en 1969². Ce ouvrage est pour nous majeur par la compréhension qu'il pose d'une maîtrise du confort sous ses formes impliquant directement l'énergie. L'auteur nous fait parfaitement comprendre la lenteur de l'incorporation dans les bâtiments des innovations techniques majeures telles que celle de l'électrification de l'éclairage et celle de la ventilation mécanique contrôlée. Les études historiques de nos cas dans la recherche HPCE démontrent à l'évidence la lenteur des transformations, d'un mode de chauffage à l'autre, d'un mix énergétique à l'autre dans le bâtiment. Pour la partie prospective nous tenons donc éminemment compte de cette lenteur des mutations technologiques. Il pourrait aisément se dérouler plusieurs décennies entre

2 Reyner BANHAM, "l'architecture de l'environnement bien tempéré" 1969, Architectural Press, Londres. Traduction en français : ed. HYX, 2011, 334 pages

le moment de l'innovation technologique sur plusieurs énergies renouvelables importantes pour la positivité des bâtiments. Par exemple le bio carburant produit à partir de la culture alguale est une innovation récente avec ses prototypes exposés à un public large³. La période de la mise en application économique de cette technique de production d'énergie sur les enveloppes des bâtiments pourrait ainsi s'étaler sur 2 ou 3 décennies. Nous avons pour cela constitué 2 horizons distincts : celui de 2020 et celui de 2050. L'horizon « 2050 » du titre même de la recherche semble en effet difficile à dépasser en se situant dans une prospective raisonnée et documentée.

3 L'exposition toute récente au Pavillon de l'Arsenal d'un prototype de production algal est à ce titre significatif. Voir : «ALGOCULTURES»

Exposition et laboratoire public d'architecture pour la construction de biofaçades". Exposition du 7 décembre 2013 au 9 février 2014 du projet «Algocultures» conçu par les architectes de l'agence XTU et les ingénieurs d'AlgoSource Technologies. Cf. le dossier de presse bien documenté : http://www.pavillon-arsenal.com/img/exposition/272/cp/PAV_272_CP.pdf - dernière consultation 30 mars 2014.

Vision des utopies énergétiques des années 70 comme lien entre histoire et prospective

Une méthode critique est mise en place par analogie avec un moment précis de l'histoire énergétique récente : le tournant des années 1970.

Pendant cette phase cruciale de « transition énergétique » certains mouvements architecturaux déploient une inventivité extraordinaire. Les oeuvres de Yona Friedman, d'Archizoom et de Superstudio mais également la dernière période de production de Buckminster Fuller sont de magnifiques créations anticipant les questions énergétiques telles que nous les analysons depuis. Ils ont imaginé un « futur sombre » mais ils ont de concert adopté une inventivité énergétique inégalée jusqu'à maintenant. Cette créativité se traduisait par des exploitations de l'énergie solaire très intégrées à l'édifice, par l'apparition d'enveloppes ultra légères maîtrisées avec des géométries sophistiquées et en mise en œuvre par une architecture gonflable. L'équilibre de cette architecture à « l'environnement plus ou moins bien tem-

péré » est pour nous une source d'inspiration pour raisonner les mix énergétiques du futur proche.

Une « perspective sombre », à la « vitalité désespérée » à propos des équipements publics majeurs.

Si nous avançons un peu dans cette direction cela pourrait s'exprimer ainsi. Une hypothèse catastrophique serait l'abandon des édifices publics majeurs à leur propre destin énergétique, avec très peu de coordination par des politiques publiques, ces équipements étant confiés à des groupements économiques privés. Nous pourrions inscrire cette perspective dans un développement important de « PPP énergétiques ». Les questions de la restauration et restructuration des enveloppes de ces édifices publics, du renouvellement des équipements de chauffage et de confort d'été arrivant à l'obsolescence d'ici 2050 se poseraient dès lors de manières très différentes de celle d'aujourd'hui. Ce futur « sombre permet-il de projeter des conditions prospectives intéressantes sur nos cas d'études?

Lors du grand développement des utopies dans les années 1950 à 1970 les grands mouvements de pensées utopiques entremêlaient prospectives positives et projections négatives. Nous opérons dans une hypothèse similaire : le futur de 2014 à 2050 assemblerait ainsi des séquences complexes, des visions énergétiques « positives » et une vitalité désespérée⁴ pour concevoir une qualité architecturale de ces réhabilitations guidées par une logique prioritaire de rentabilité à moyen terme. La lucidité n'est pas ici la qualité la plus accessible pour développer un spectre large de futurs énergétiques possibles sur nos édifices architecturaux parisiens. Il nous faut reconnaître que mettre en prospective le futur énergétique de ces édifices emblématiques nous conduit à investir un futur architectural engagé, revisitant les visions des avant-gardes des sixties et seventies.

4 Voir Roland Barthes, Le neutre, citant un poème de P. P. Pasolini. Cours au Collège de France (1977 - 1978), p.106, éd Seuil IMEC, Paris, 2002, 265 p.

L'hypothèse centrale du TEPOS pour la prospective du BEPOS

Nous résumons ici notre hypothèse centrale : il est nécessaire de supposer un TEPOS (**Territoire à Énergie Positive**) pour baser nos prospectives à l'échelle du bâtiment, c'est à dire celle de nos cas d'étude. En effet nous posons un objectif initial à nos prospectives : transformer nos bâtiments étudiés en BEPOS (Bâtiment à Énergie Positive) à l'horizon de 2050.

Cette recherche prospective élabore une vision sur une durée relativement courte 2014 / 2050 : ceci permet de nous ancrer dans les référentiels communs et actuellement accessibles, bien que dispersés et encore peu coordonnés. Cette démarche prospective veut entrer en résonance avec l'histoire énergétique sur une longue durée du reste de la recherche HPCE.

Ce chapitre développe donc une prospective basée sur la notion de TEPOS : le Territoire à Énergie

Positive. Un territoire à énergie positive est un "territoire dont les besoins d'énergie ont été réduits au maximum et sont couverts par les énergies renouvelables locales, selon les 3 principes de la démarche « négaWatt » : « sobriété énergétique, efficacité énergétique et énergies renouvelables ». Il semble bien entendu plus aisé de créer des TEPOS sur des territoires à densité très faible et où l'espace disponible pour la production est abondant. Dans les villes à forte densité comme Paris le foncier d'implantation des nouvelles énergies n'est pas accessible à un coût supportable et ceci est un véritable obstacle au développement durable des énergies renouvelables. Cependant cette très forte densité urbaine s'avère être un formidable atout pour les recyclages énergétiques et facilite la mutualisation énergétique par le biais des réseaux existants à optimiser et développer encore. Ce très fort « métabolisme » de la ville historique dense nous aide considérablement pour conceptualiser les futurs TEPOS.

Le TEPOS est argumenté dans cette recherche HPCE par une cartographie des gisements énergé-

tiques. La spatialisation des gisements accessibles localement se fait particulièrement par des coupes à plusieurs échelles. Puis l'étude détaillée nos équipements, ce qui permet de développer la prospective à l'échelle de l'édifice. **Cette recherche se base sur les énergies renouvelables qui existent localement en gisement dans la ville dense, dans Paris.**

Nous allons présenter cette prospective par le jeu des échelles dénommées respectivement S, M, L et XL⁵. Nous souhaitons passer d'une échelle à l'autre de manière lisible : nos coupes, nos indicateurs énergétiques ont des contenus et des visées d'évaluation par des mesures différentes à chaque

5 La référence au livre culte de Rem Koolhaas et de Bruce Mau "S,M,L,XL" (Édition Monacelli Press, 1995) est revendiquée ici, afin de renvoyer à une conception du projet de territoire à plusieurs échelles simultanées. Cette approche du projet est devenue depuis le travail de l'OMA largement partagée par de nombreux architectes urbanistes. On consultera utilement la page du site de l'OMA sur cette publication : <http://www.oma.eu/publications/smlxl> (dernière consultation le 30 mars 2014).

échelle.

Voici une brève définition des échelles de la prospective HPCE :

S : pour le cas étudié / le bâtiment.

M : pour l'îlot, comparé par des cartes de format carré de 300 mètres par 300 mètres, soit 9 ha, soit environ une capacité moyenne de 2 500 habitants.

L : pour Paris intramuros, y compris les 2 boisements à l'Est et à l'Ouest.

XL : pour le Grand Paris et la Région Île de France.

Pour l'exposé de ce chapitre nous partirons de l'échelle XL, allant successivement vers l'échelle S. Ce jeu des échelles enchâssées est notre garantie **d'une approche de l'énergie fondée sur la spatialité et le territoire.**

2. PROSPECTIVE À L'ÉCHELLE XL : RÉGION ÎLE DE FRANCE

2.1 Sobriété et efficacité.

Nous nous référons au débat national en cours sur la « transition énergétique »⁶. L'intitulé de ce débat se veut explicite : « Sur la transition énergétique - Imaginons ensemble notre énergie de demain »!

Les « Cahiers d'acteurs », les rapports des groupes de travail du Conseil National sont particulièrement bien documentés et constituent un solide appui à la réflexion prospective. On se reportera donc aux travaux des différents groupes de travail, et particuliè-

⁶ Référence du débat national sur la transition énergétique : voir les très documentés Cahiers diffusés par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Conseil National pour la Transition énergétique, Sur la transition énergétique » Imaginons ensemble notre énergie de demain, les Cahiers d'Acteurs, rapports du groupe de travail du Conseil National, avril 2013. Les cahiers sont répartis par rapport aux 7 groupes de travail.

ment au rapport du groupe 2 : « Quelle trajectoire pour atteindre le mix énergétique en 2025? Quels types de scénarios possibles aux horizons 2030 et 2050, dans le respect des engagements climatiques de la France? »

Nous nous inscrivons dans les principes des scénarios de 2 « trajectoires » : la trajectoire intitulée « **Sobriété énergétique et sortie du nucléaire** » et la trajectoire intitulée « **Efficacité énergétique et diversification** ».

Rappelons les fondamentaux de ces 2 « trajectoires » et ce qui les nuancent. Un niveau de consommation bas : avec une réduction de la demande très forte (50% en 2050) pour nos 2 trajectoires. Mais c'est sur le **mix énergétique** que les 2 trajectoires se distinguent : priorité aux énergies renouvelables pour la trajectoire « Sobriété » et diversification des énergies pour la trajectoire « efficacité ».⁷

⁷ Les auteurs des scénarios pour les 2 trajectoires sont

Une bonne connaissance est cependant nécessaire de la vaste documentation sur le débat des énergies pour Paris et pour le Grand Paris. L'exercice prospectif de cette recherche est adossé à de nombreuses sources qui méritent d'être approfondies. Ainsi pour l'énergie à Paris, on trouve une profusion de documents de différentes portées politiques, de la recommandation à l'engagement; et à l'attention de différents acteurs, du grand public à l'expert. Le **Plan Climat** reste le document engageant, avec notamment ce qui peut pour nous être « prémonitoire » : **une liste d'équipements communaux avec un rôle de levier** pour remplir des objectifs d'énergies durables. Le Plan Local Énergie n'était pas encore disponible pour cette recherche. Son élaboration devrait être l'opportunité de réaliser des avancées sur la cartographie des énergies en Île de France.

les suivants :

- Pour la trajectoire « Sobriété » : négaWatt - Greenpeace - WWF - Global Chance
- Pour la trajectoire « Diversification » : ADEME - GRDF - ANCRE - Encilowcarb renf

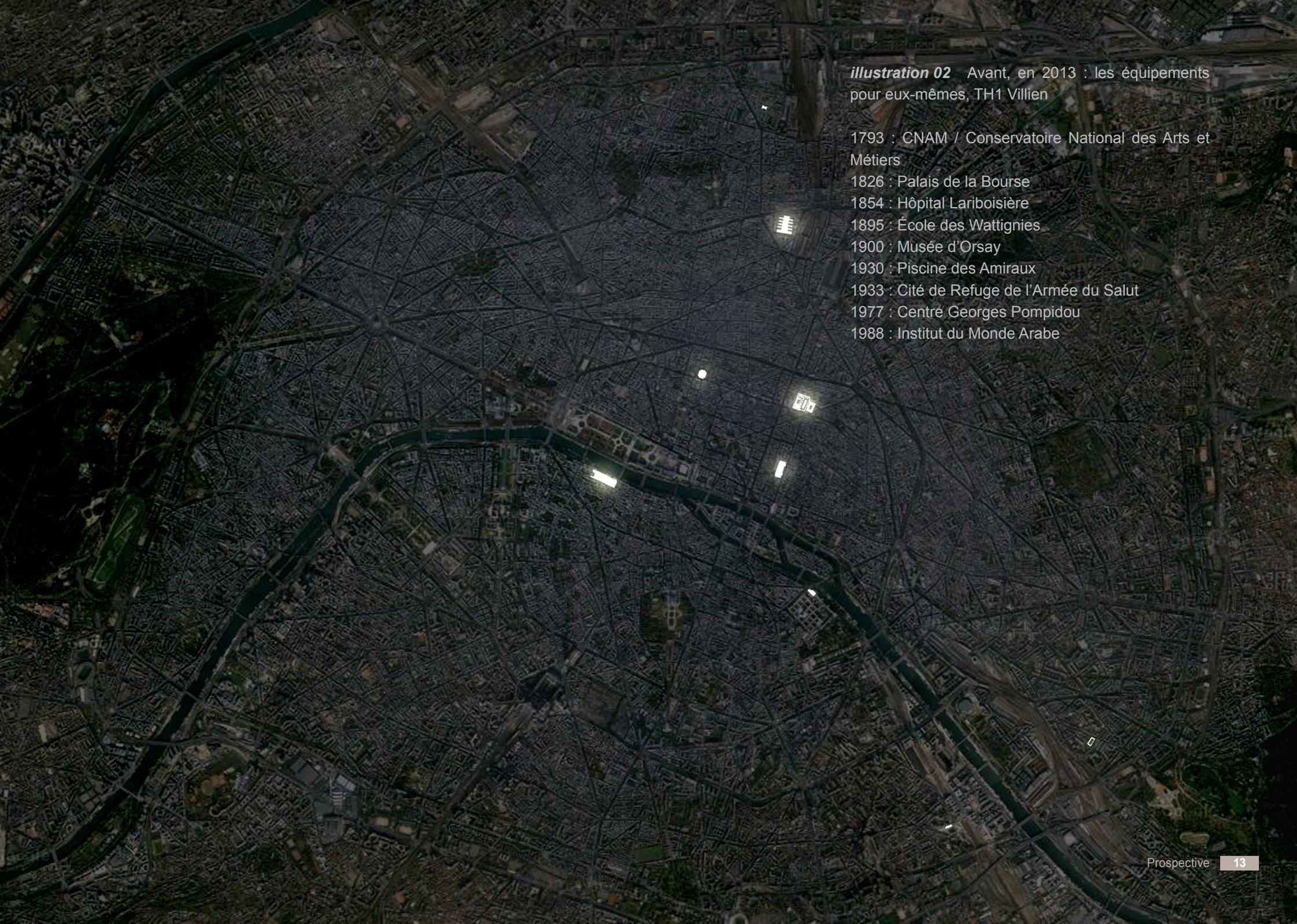


illustration 02 Avant, en 2013 : les équipements pour eux-mêmes, TH1 Villien

- 1793 : CNAM / Conservatoire National des Arts et Métiers
- 1826 : Palais de la Bourse
- 1854 : Hôpital Lariboisière
- 1895 : École des Wattignies
- 1900 : Musée d'Orsay
- 1930 : Piscine des Amiraux
- 1933 : Cité de Refuge de l'Armée du Salut
- 1977 : Centre Georges Pompidou
- 1988 : Institut du Monde Arabe

illustration 03 Prospective HPCE : des TEPOS «pionniers», TH1 Villien

1793 : CNAM / Conservatoire National des Arts et Métiers

1826 : Palais de la Bourse

1854 : Hôpital Lariboisière

1895 : École des Wattignies

1900 : Musée d'Orsay

1930 : Piscine des Amiraux

1933 : Cité de Refuge de l'Armée du Salut

1977 : Centre Georges Pompidou

1988 : Institut du Monde Arabe



illustration 04 Après en 2050 : les équipements ensemble par des TEPOS, TH1 Villien



Des réflexions sont proches de nous, ainsi celle de Franck Boutté et de l'AUC⁸ synthétisée par la notion de « TEGPOS » : de Territoire à Énergie Globale Positive.

Disons qu'ici nous nous calons sur l'angle énergétique au sens strict. Les énergies nécessaires à notre « positivité territoriale » sont ici toutes évaluables in fine en KW.

Un BEPOS est un « Bâtiment à Énergie Positive ». Nous soutenons pour cette prospective que les « BEPOS » seront les pionniers et les leviers de la transition énergétique dans la mesure seulement où ils seront développés en rapport avec leur TEPOS.

8 Nous renverrons aux travaux Franck Boutté Consultants sur le "TEGPOS" : <http://franck-boutte.com/?p=3639> - consulté le 29 octobre 2013. « Depuis 2010, l'agence développe une réflexion autour du TEGPOS, territoire à Énergie Globale Positive. Au-delà de la préoccupation bâtementaire et de la focalisation sur la simple énergie blanche il s'agit de quitter l'idéal d'autonomie performancielle du BEPOS, bâtiment à énergie positive, pour le partage du bien commun et la valorisation des multiples énergies présentes sur un territoire. »

Dans cette prospective nous n'envisageons donc pas de BEPOS sans TEPOS. Nous replaçons chaque édifice étudié dans son « contexte énergétique » (*illustrations 2 et 3*).

Il s'agit d'apprécier quelles énergies lui sont accessibles, quels stockages énergétiques lui sont possibles dans son emprise, quelles évolutions programmatiques sont imaginables. L'hypothèse est de transformer chacun de nos équipements patrimoniaux en producteurs d'énergie à partir de leurs « gisements », ceux de leur territoire spécifique. Chacun de nos cas deviendrait ainsi un BEPOS, un bâtiment à Énergie Positive. Mais nos édifices sont agrégés entre eux par des TEPOS.

Le bâtiment à énergie positive (BEPOS) est un bâtiment qui a une très faible consommation énergétique (thermique, électrique, ...). Celle-ci peut alors être assurée par des systèmes autonomes comme l'éolien, le photovoltaïque, le photothermique, etc. L'un des objectifs du Grenelle de l'Environnement, le BEPOS est un objectif à atteindre pour 2020 pour

tous les bâtiments neufs. Pour se faire le bâtiment neuf doit être entièrement repensé pour permettre un bon niveau de confort tout en demandant très peu d'énergie.⁹

Dans notre recherche portant sur des équipements publics cette notion de BEPOS est délicate à appliquer. Nous partons de bâtiments à réhabiliter. Ces édifices sont particulièrement consommateurs, ceci étant en lien avec le besoins qu'ils satisfont : conservation d'oeuvres, régulation poussée des ambiances, intermittence des usages,... Notre hypothèse de prospective de faire de ces édifices des pionniers énergétiques demande donc des simulations quantitatives poussées. Nous verrons à l'échelle S comment cadrer ce travail sans le développer dans ses détails car cela excède les limites de la recherche HPCE.

9 « Il faut rendre les équipements plus sobres ou plus efficaces par la réglementation » Extrait de l'audition de Paul Salomon – Negawatt – lors du Conseil national du débat sur la transition énergétique - Groupe de travail no 2 Mix/scénarios – cf. Relevé de conclusions de la 9e réunion du 2 mai 2013. Page 67.

« Il faut rendre les équipements plus sobres ou plus efficaces par la réglementation » : voici un objectif du Plan Climat et de la « transition énergétique ». Dans le cadre de la prospective de la recherche HPCE allons plus loin. **Il faut transformer en BEPOS tous les équipements publics de Paris intramuros.** Bien entendu cette hypothèse extrême révèle de manière exemplaire les potentiels de nos cas d'étude.

2.2 Des TEPOS structurés par des « équipements pionniers positifs »

Nous ignorons la configuration, les limites des TEPOS parisiens à venir. Par contre dans le cadre de cette recherche nous connaissons avec une bonne définition ces bâtiments emblématiques, pionnier du point de vue de l'énergie. Nos cas sont tous des édifices qui ont porté des innovations quant à l'usage de l'énergie. Ils pourraient fort bien continuer sur cette ligne et devenir les « condensateurs » d'une nouvelle organisation énergétique du territoire.

Les équipements à Paris sont extrêmement nombreux et de toute nature. Ils ont des formats passant du minuscule au gigantesque. Nos cas eux représentent déjà une fourchette importante : de la Cité de Refuge de l'Armée du Salut au CNAM nous avons un facteur de 1 à 10 pour les surfaces de plancher.

Si un grand nombre d'équipements de Paris deviennent « positifs » du point de vue de l'énergie le paysage énergétique change radicalement (*illustration 04*). Cette hypothèse présente de nombreux atouts. L'effet levier des équipements est bien identifié en urbanisme : nous avons la conviction qu'ils peuvent être de formidables outils de la rénovation énergétique urbaine dense et diffuse. L'un des intérêts d'agir par les équipements publics résidera peut-être également par une monétarisation des TEPOS plus aisée à mettre en place. Enfin le rythme de la transition énergétique locale pourrait être accéléré.

Pour cet objectif, à l'échelle XL, l'Île de France, les critères quantitatifs restent très flous à ce stade

d'avancement de la transition énergétique. Aussi nous nous attachons tout d'abord à **hiérarchiser** de manière documentée les énergies les unes par rapport aux autres, et ainsi d'en déduire des tendances lourdes pour certaines et faibles pour d'autres.

Raisonner en comparant les énergies entre elles

Pour pouvoir comparer nos cas et les énergies entre elles nous avons utilisé une méthode apparentée aux référentiels du développement durable.

2.3 Un référentiel de l'énergie accessible localement

Il s'agit de raisonner en comparant les énergies entre elles. Pour pouvoir comparer nos cas et les énergies entre elles nous avons mis en place pour cette recherche HPCE un référentiel, apparentés à ceux existants pour le développement durable.

Ces méthodes se structurent par des « objectifs »

(piliers, cibles, ...) en nombre limité (en général de 10 à 20). Puis ces méthodes se détaillent par objectif grâce à des « indicateurs »¹⁰, c'est à dire par des critères d'évaluation cadrés et mesurables. Ces méthodes sont diverses mais elles sont toutes basées sur un impératif de comparaison et d'évaluation pour permettre notamment des extrapolations, servant de guides dans les choix des projets. Les temporalités des projets engagés par ces référentiels vont de quelques années à quelques décennies (architecture, infrastructure, urbanisme, design).

Nous avons structuré notre méthode comparative, notre référentiel ultra local avec les **3 grands objectifs d'un TEPOS : la durabilité, l'autonomie, et la rentabilité**.

Nous avons structuré notre méthode comparative

10 Il est intéressant de noter que les groupes de travail pour le Débat National sur la transition énergétique ont basé leurs travaux sur des indicateurs spécifiques à la démarche. Cf. page 38 du rapport du Groupe 2 qui établit ses indicateurs à la suite d'un vote.

avec les **3 grands objectifs d'un TEPOS : la durabilité, l'autonomie, et la rentabilité**

Ces objectifs sont détaillés par **6 indicateurs** (*illustration 5*) :

L'objectif de **durabilité** : évalué par 2 indicateurs « classiques » :

- le renouvelable,
- le comportement environnemental.

L'objectif **d'autonomie** : évalué par 2 indicateurs « en développement » :

- la proximité,
- la légèreté de l'infrastructure requise.

L'objectif de **rentabilité** : évalué par 2 indicateurs « durs » :

- la puissance (rendement énergétique) ;
- le retour sur investissement.

Il est malaisé d'établir les unités de mesures de ces indicateurs.

Mais nous avons étalonné les données et établi le recueil de celles-ci pour une évaluation large, basée sur une échelle de 1 à 5, ce qui devrait pour notre recherche suffire (*voir page suivante*).

Ces évaluations sont instructives car elles établissent des convergences entre les énergies elles-mêmes.

L'état des conditions initiales fait ressortir deux points majeurs. Tout d'abord il est évident que nous affichons une forte dépendance aux énergies importées à fort rendement. Ensuite nous constatons que la proximité est un objectif atteignable pour une bonne moitié des énergies étudiées.

Il nous faut donc étudier comment développer ces objectifs à l'échelle L, celle de la ville.

illustration 05 Référentiel des énergies locales : caractéristiques énergétiques retenues selon les 6 indicateurs, TH1 Villien

CARACTÉRISTIQUES ÉNERGÉTIQUES RETENUES

		AUTONOMIE		DURABILITÉ		RENTABILITÉ	
		Proximité	Légereté (de l'infrastructure déployée)	Renouvelable	Sobriété	Puissance (rendement énergétique)	Retour sur investissement
Fossiles	Charbon	>300km et étranger	Mines ou extractions à ciel ouvert	Non	Très fortes émissions de GES	7,23kWh/kg 60%	Infrastructure d'extraction + main d'œuvre + transport
	Dérivés du pétrole: Fioul, Gazole, GPL, Coke, etc...	étranger	Infrastructures d'extraction + raffineries	non	risques environnementaux + forte émission de GES	11,7kWh/kg 60% (fioul)	Infrastructure d'extraction + main d'œuvre + transport
	Uranium (nucléaire)	<100km:2000MW >300km: 63GW (France)	Centrales de taille conséquente	non	faibles émissions de GES mais risques environnementaux élevés	70Mwh/kg	Infrastructure d'extraction + main d'œuvre + infra. transport
	Gaz naturel	>300km (2%) et étranger	Infrastructure d'extraction + reseau gazoduc	non mais reserves encore importantes	Emissions de GES	13,90 kWh/kg 75%	Infrastructure d'extraction + main d'œuvre + infra. transport
	Gaz de Schiste	Locale, possible en IDF	Infrastructure d'extraction + reseau gazoduc	non mais reserves encore importantes	Risques environnementaux liés aux nappes phréatiques + GES	entre 10 et 12 kWh/nm3	Infrastructure d'extraction + main d'œuvre + infra. Transport
Renouvelables	Géothermie	Locale et régionale	Forage + centrale ou forage simple pour puit canadien	Oui en surface, non mais démesurée en profondeur	Impact plutôt faible	Variable selon profondeur	Infrastructure d'extraction + PAC. En captage individuel, appoint nécessaire.
	Valorisation déchets par combustion	Echelle métropolitaine	Centrale thermique	Oui	Chaleur "Fatale", impact compté comme nul par les études réalisées mais polluant en réalité	1,95 kWh/kg	Disponibilité/gratuité des ressources. Appoint
	Solaire Thermique	intégré, ultra locale	Surface (sol, toiture, facade)	oui	Très propre	400 kWh/m2 à 40%	Gratuité, nécessite infra. de captage + PAC. + Appoint (env. 60%)
	Solaire Photovoltaïque	intégré, ultra locale	Surface (sol, toiture, facade)	oui	Très propre	110 à 140 kWh/m2 à 40%	Gratuité, nécessite infra. de captage et stockage + Appoint (env. 60%). Revente surplus possible.
	Biomasse combustible (conversion thermochimique)	Echelle régionale	Centrale thermique	oui / jusqu'à un certain seuil	Impact plutôt faible	Bois: 3.34 kWh/kg 50% à 95%	Ressources gratuites ou à faible coût.
	Récupération de calories (Eaux usées, Serveurs...)	Echelle métropolitaine	Raccordement à des réseaux, des sources existantes ou en interne	Oui	Très propre	récup. EU: 3,5kW/mL	Raccordement au réseau + PAC (+ appoint 20%)
	Biogaz et méthanisation (fermentation, distillation, culture énergétique)	Echelle régionale	Digesteur anaérobie	Oui	Impact faible, Restitution du carbone absorbé	Pond: 650 kWh/m2 Photobioreacteur: 1840 kWh/m2	Infrastructure de captage (+ ou- chère selon type de prod.), ressources gratuites (+ transport selon cas)
	Eolienne	Locale ou <20km	Dépend du système / infrastructure verticale	oui	Propre	Dépend du site et du système déployé	Infrastructure d'extraction + infra. Transport (gratuité de ressource en captage individuel)
	Hydraulique	>300km Faible potentiel régional	barrages :Grosse infrastructure hydraulienne : plus modeste	oui	Propre pour hydrauliennes, risques environnementaux pour les barrages	0.5 à 1m/s = 4kWh (Seine) 2 à 3 m/s = 120kWh (Saint-Laurent, Montréal)	Infrastructure d'extraction + infra. Transport
Mixtes	/Réseaux de chaleur/ (fossile, biomasse, incinération, géothermie, autres)	Echelle métropolitaine, nécessite un besoin important	Centrales urbaines ou périurbaines	Dépend des énergies utilisées	Mutualisation énergétique, impact variable selon énergies	variable selon énergie	Infrastructure d'extraction ou d'incinération + infra. distribution
	Cogénération / Tri-génération	Proche, nécessite un besoin important	Centrales urbaines ou périurbaines	Dépend du combustible utilisé	Récupération d'énergie, limitation de pertes globales, nécessite cependant une combustion	30 à 40% de rendement en + par rapport à un système classique	Centrale thermique ou d'incinération + reseau urbain ou privé

Diagramme radar (*illustrations 6, 7 et 8*), indices d'appréciation

Les unités de mesures des distances et du transport de l'énergie (mode d'appréciation de 0 à 5) :

0 si importation avec transport >1 000 km. (XXL), 1 si nécessite transport entre 300 km et 1 000 km (XL), 2 si captage/production de l'énergie est possible dans un rayon de 300 km (L) , 3 si captage/production de l'énergie est possible à l'échelle de la ville et ses alentours pour une redistribution par réseau (M), 4 si captage/production de l'énergie est possible à l'échelle du quartier (S), et 5 si possibilité de captage/production de l'énergie possible à l'échelle de la rue ou intégrée au bâtiment (XS)

Cet indicateur cherche à rendre compte du potentiel de production ou de captage local d'une énergie. La masse des ressources disponibles peut entrer en compte dans l'appréciation choisie pour le cas où une ressource énergétique ne soit pas disponible en

quantité suffisante.

Les unités de mesures de l'importance des infrastructures à déployer (mode d'appréciation de 1 à 5) :

1 correspond à une infrastructure de taille très importante tant au niveau de la production que de la distribution, jusqu'à 5 pour une infrastructure facilement intégrable ou dont le processus de captage/production est invisible.

Cet indicateur met en lumière la place des outils de production d'énergie dans le territoire.

Les unités de mesures de renouvelabilité des énergies (mode d'appréciation de 0 à 5) :

0 correspond à une énergie dite « non renouvelable » dont le temps de maturation nécessite plusieurs millions d'années, jusqu'à 5 pour une énergie disponible en abondance et ne nécessitant pas de temps de « recharge ».

Ce critère met en évidence les ressources inépuisables dont nous disposons pour la mise en place d'un système durable. Si un bon nombre d'énergies sont dites « durables », elles ne se renouvellent pas toutes à la même vitesse : le système d'appréciation tient compte de leurs limites.

Les unités de mesures de pollutions des énergies (mode d'appréciation de 1 à 5) :

1 correspond à une énergie très polluante par ses émissions de gaz à effet de serre et/ou les risques environnementaux et sanitaires liés à sa production ou son usage, jusqu'à 5 pour une énergie ou un système dont le bilan carbone est considéré comme nul et ne présentant pas de risques sanitaires ou environnementaux.

Les unités de mesures de rendement de la production (mode d'appréciation de 1 à 5) :

1 correspond à une énergie peu rentable dont la production ou les gains sont faibles et dont l'amortis-

illustration 06 Référentiel des énergies locales : indice d'appréciation des énergies (échelle de 1 à 5), TH1 Villien

sement est très long ou inexistant, jusqu'à 5 pour une énergie très productive et économique.

Les unités de mesures de prix de l'énergie (mode d'appréciation de 1 à 5) :

1 correspond à une énergie dont le prix au kWh est très élevé pour le consommateur, jusqu'à 5 pour une énergie bon marché.

Le cours des matières premières évoluant sans cesse, l'appréciation des prix est effectuée de manière approximative en tenant compte des évolutions des dernières années pour effectuer une moyenne quand cela est possible.

	AUTONOMIE		DURABILITÉ		RENTABILITÉ	
	Proximité	Légèreté (de l'infrastructure déployée)	Renouvelable	Sobriété	Puissance (rendement énergétique)	Retour sur investissement
	1	2	1	0	4	4
	0	2	0	0	4	3
	2	1	0	1	5	3
	1	2	1	2	4	2
	3	2	0	1	4	2
	4 à 5	4	3	4	3	3
	3 à 5	4	5	3	3	5
	5	5	5	5	3	3
	5	5	5	5	2	3
	2	4	4	3	3 à 5	5
	5	5	5	5	2	5
	3 à 5	4	4	4	3 à 4	1 à 5
	3 à 5	2	5	5	1 à 4	2
	2	2	5	3	1 à 3	2
	4	3	3	0 à 4	3	3
	4	3	2 à 4	2 à 4	4	4

INDICES D'APPRECIATION (sur 5)

illustration 07 Référentiel des énergies locales : diagramme radar global des appréciations par indicateurs et par énergies, TH1 Villien

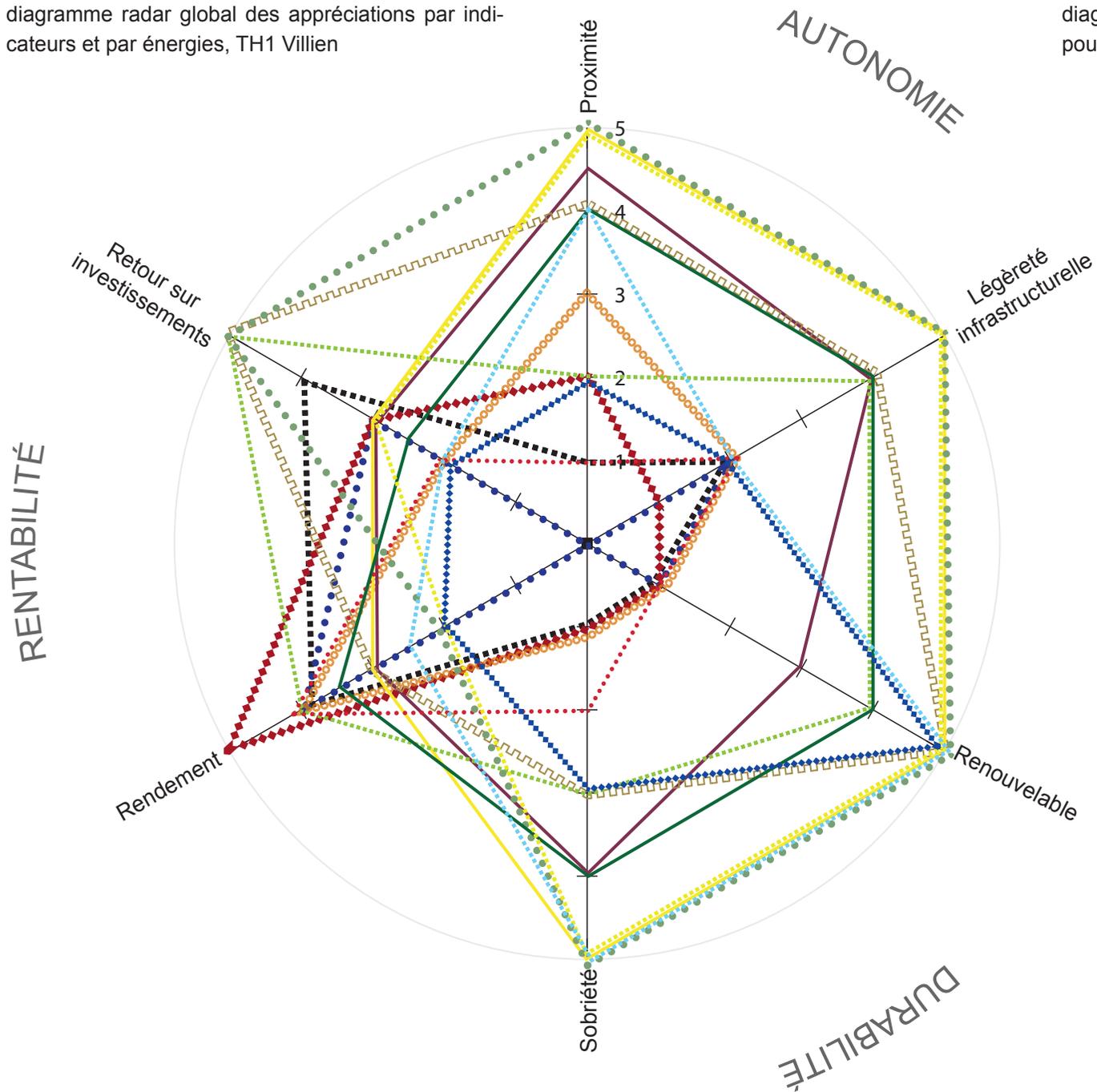
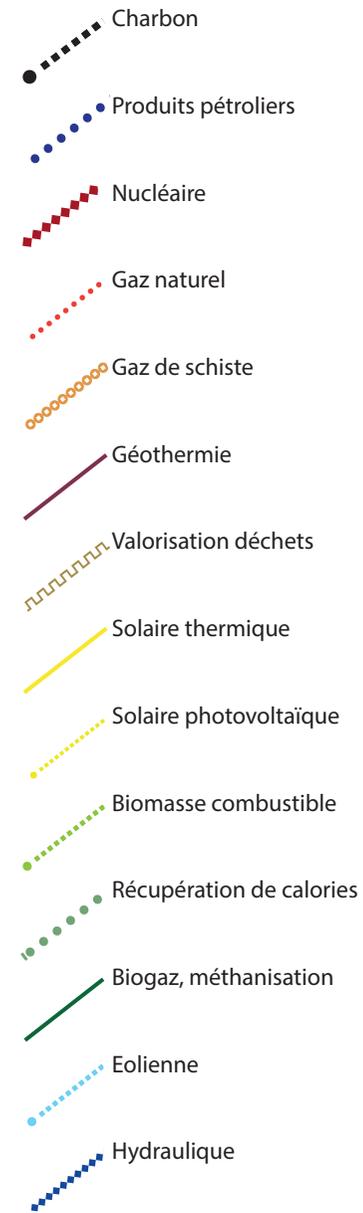
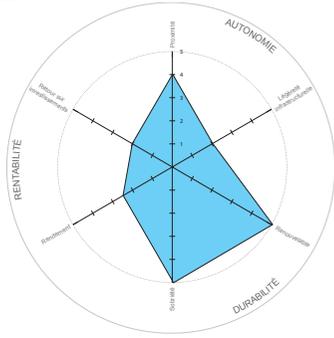


illustration 08 Référentiel des énergies locales : diagramme radar par énergie des appréciations pour les 6 indicateurs, TH1 Villien >

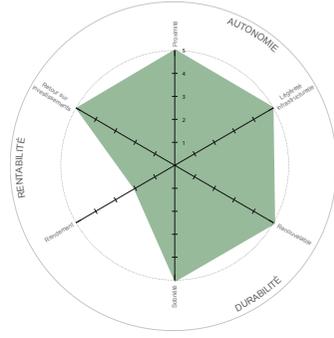




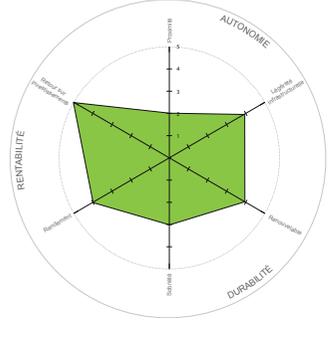
EOLIE



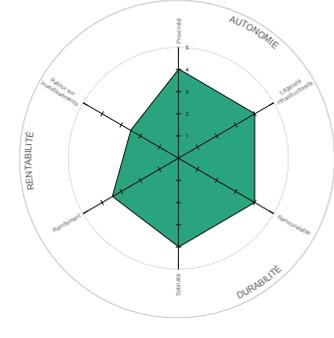
RÉCUPÉRATION DE CALORIES



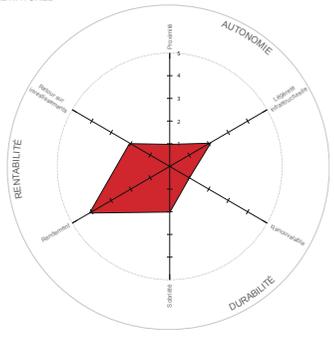
BIOMASSE



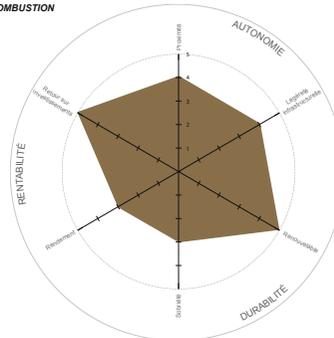
BIOGAZ



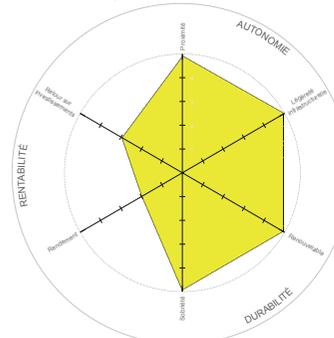
GAZ NATUREL



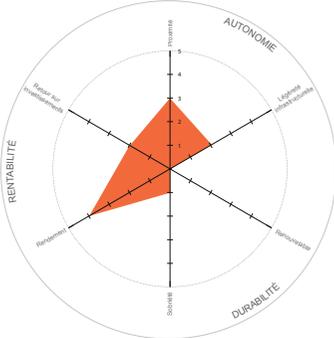
VALORISATION DES DÉCHETS PAR COMBUSTION



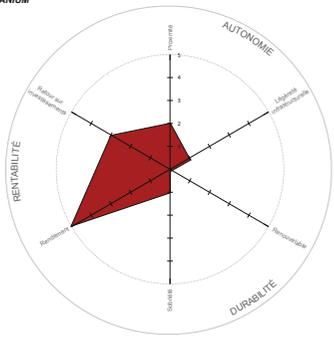
SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE



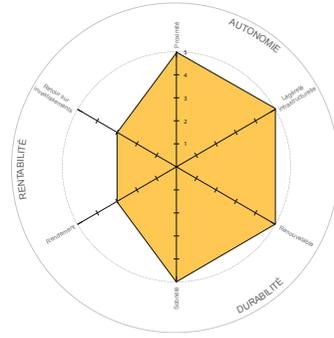
GAZ DE SCHISTE



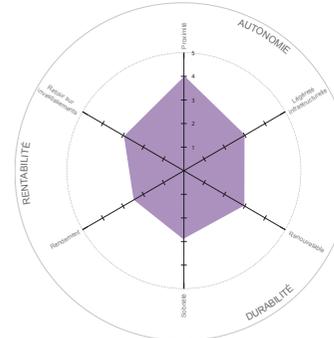
URANIUM



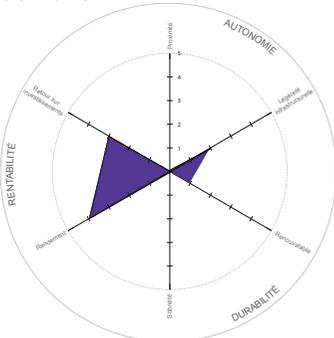
SOLAIRE THERMIQUE



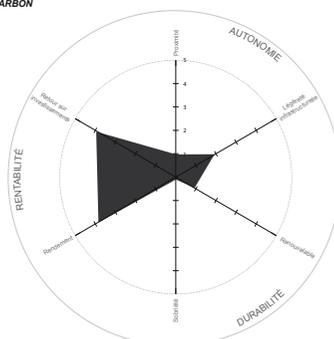
RÉSEAU DE CHALEUR



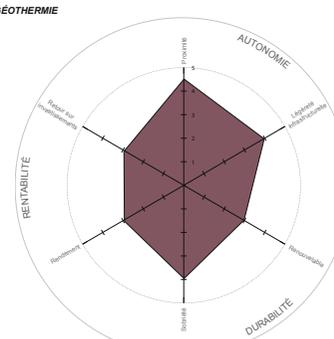
PRODUITS PÉTROLIERS



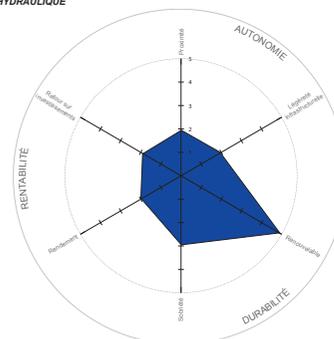
CHARBON



GÉOTHERMIE



HYDRAULIQUE



COGÉNÉRATION

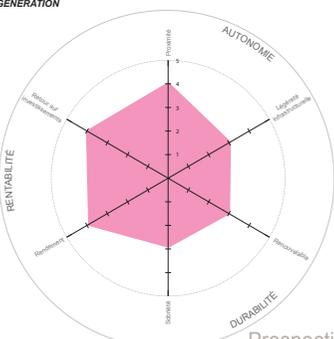
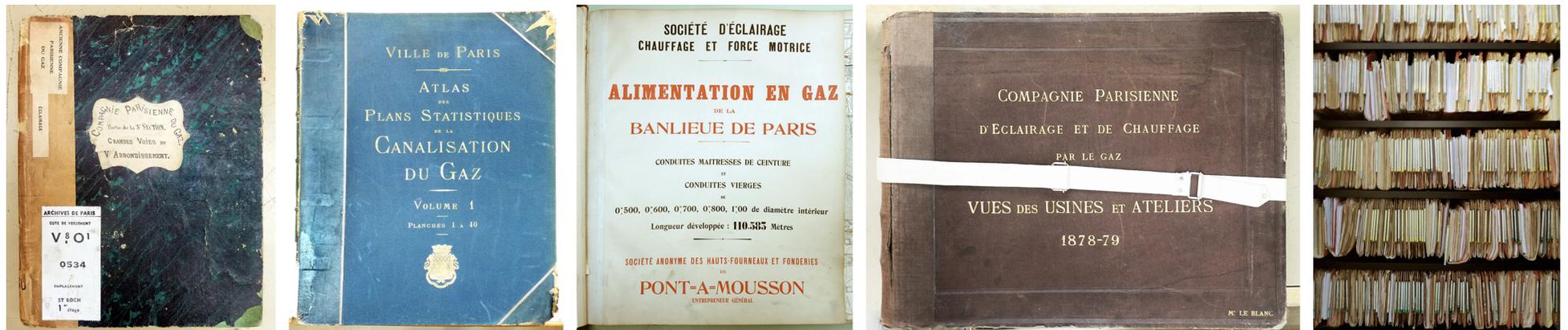


illustration 09 Travail en archives sur cartes historiques sur l'énergie à Paris, prise de vues: TH1 Villien



3. PROSPECTIVE À L'ÉCHELLE L : VILLE DE PARIS

Passage de l'échelle parisienne à l'échelle des bâtiments

3.1 Cartographie de l'énergie

La cartographie énergétique un outil très efficace à cette échelle L. Et surtout elle nous désigne une voie d'accès majeure : elle est l'une des conditions majeures pour une bonne lisibilité des enjeux énergétiques développables, et donc de leurs potentiels.

La cartographie des énergies ne date pas d'aujourd'hui. Elle est même extraordinairement instructive pour notre prospective. Nous tenons là un lien très puissant entre histoire et prospective.

Quelques investigations en archives nous ont démontré la fécondité de cette approche : sur le gaz, ses réseaux, ses usines, sur les égouts, sur les réseaux d'air comprimé aujourd'hui démantelés... (*il-*

lustration 09)

La cartographie de l'atlas de 1976 élaboré par Gérard Jigaudon est particulièrement précieux et évocateur pour nos questionnements contemporains.

Ainsi les machines à vapeur dans la ville se multiplient avec les années, de 1870 à 1900. (*illustration 10*)

Ainsi le gaz de coke est produit et stocké localement, engendrant la présence dans la ville des fameux et spectaculaires gazomètres (*illustrations 13 et 14*).

Encore voit-on sur les cartes plus détaillées les lieux où l'on produit de l'énergie pour ses propres besoins et pour d'autres besoins à satisfaire alentour. Il s'agit d'une véritable constellation de « points énergétiques positifs » dans la ville bien présents dans la ville du XIXème siècle (*illustration 12*).

Voilà donc des paysages très suggestifs issus d'une production locale de l'énergie,... illustrés un l'atlas photographique de 1878.

En 1900 certains immeubles dans Paris sont éclairés au gaz et d'autres à l'électricité, nous sommes en plein dans une transition énergétique majeure, bien documentée mais très oubliée. Discrimination sociale, cohabitation énergétique mais transition quand même, progressive, partant des « beaux quartiers » puis gagnant toute la capitale (*illustrations 15, 16 et 17*).

Les « bouquets énergétiques » des îlots parisiens différent. Comme aujourd'hui et comme demain d'un quartier à l'autre nous aurons des « mix énergétique » différents. Aurions-nous une fâcheuse tendance à sous-estimer la diversité des situations énergétiques urbaines denses à Paris?

Ainsi pouvons-nous affirmer que les TEPOS parisiens auront des configurations très diverses, tant par leur puissance que par leur mix énergétique.

illustration 10 Atlas Daumas, Évolution de la géographie industrielle de Paris et sa proche banlieue au XIXe siècle, 1976 : planche 5 : nombre et puissance des machines à vapeur en 1872, 1882, 1895 et 1905.

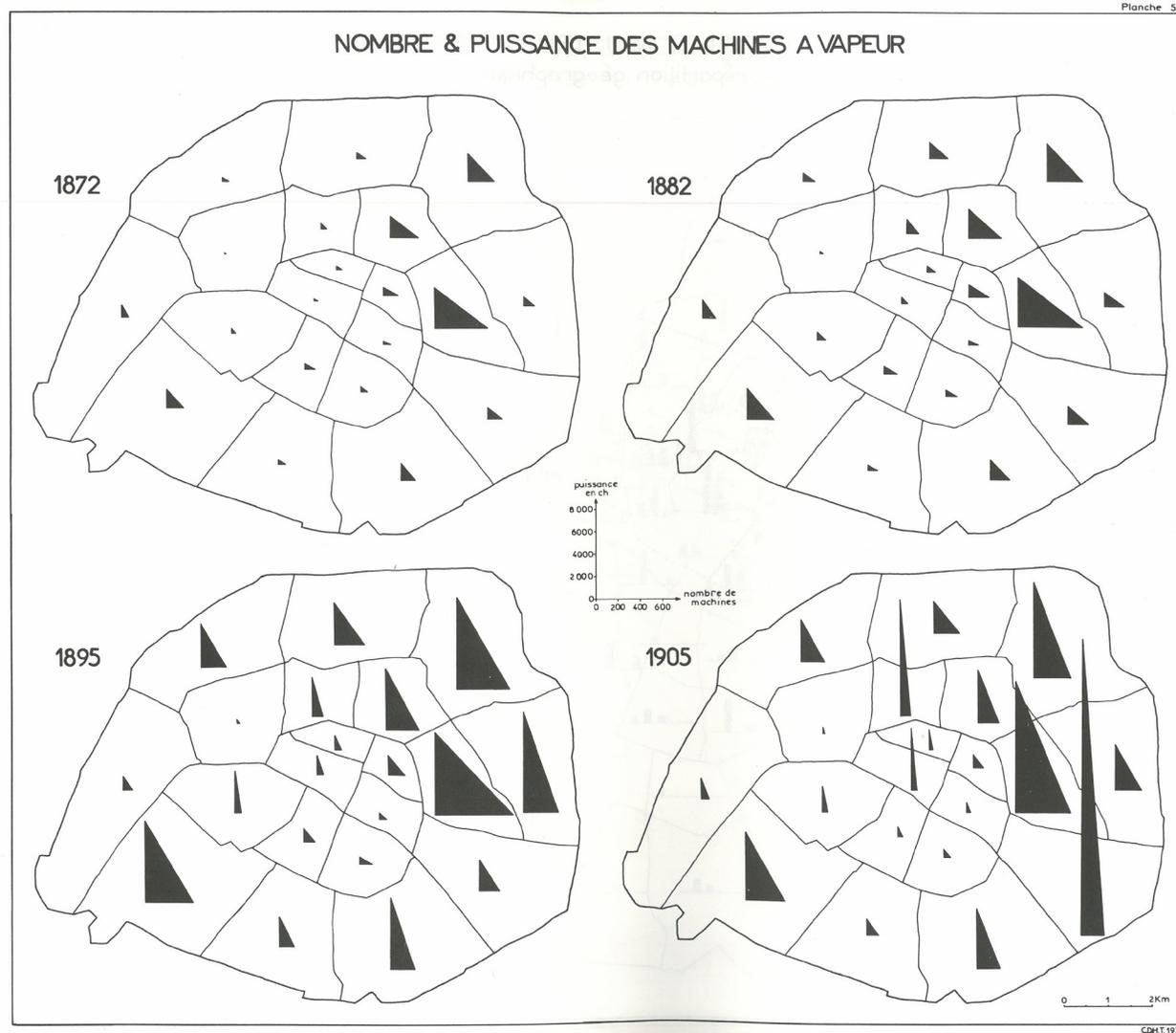


illustration 11 Plans historiques sur l'énergie à Paris : atlas Daumas, Évolution de la géographie industrielle de Paris et sa proche banlieue au XIXe siècle, 1976 : concessions et usines de gaz en 1843.

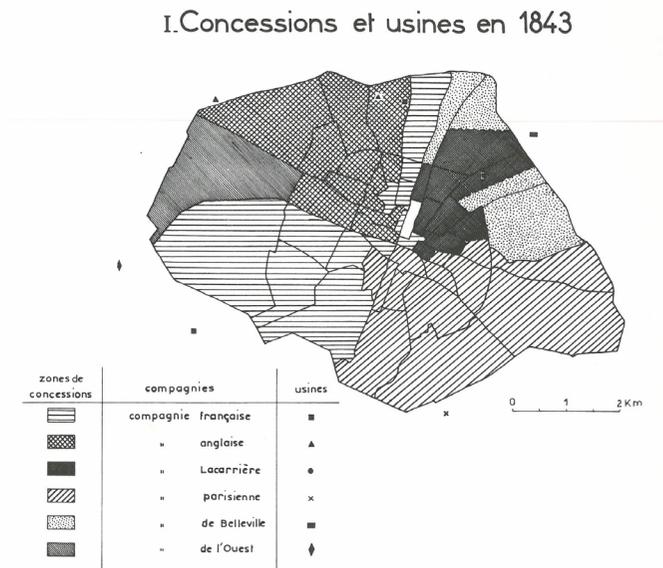


illustration 12 Atlas Daumas, Évolution de la géographie industrielle de Paris et sa proche banlieue au XIXe siècle, 1976 : planche 5 : nombre et puissance des machines à vapeur en 1872, 1882, 1895 et 1905.

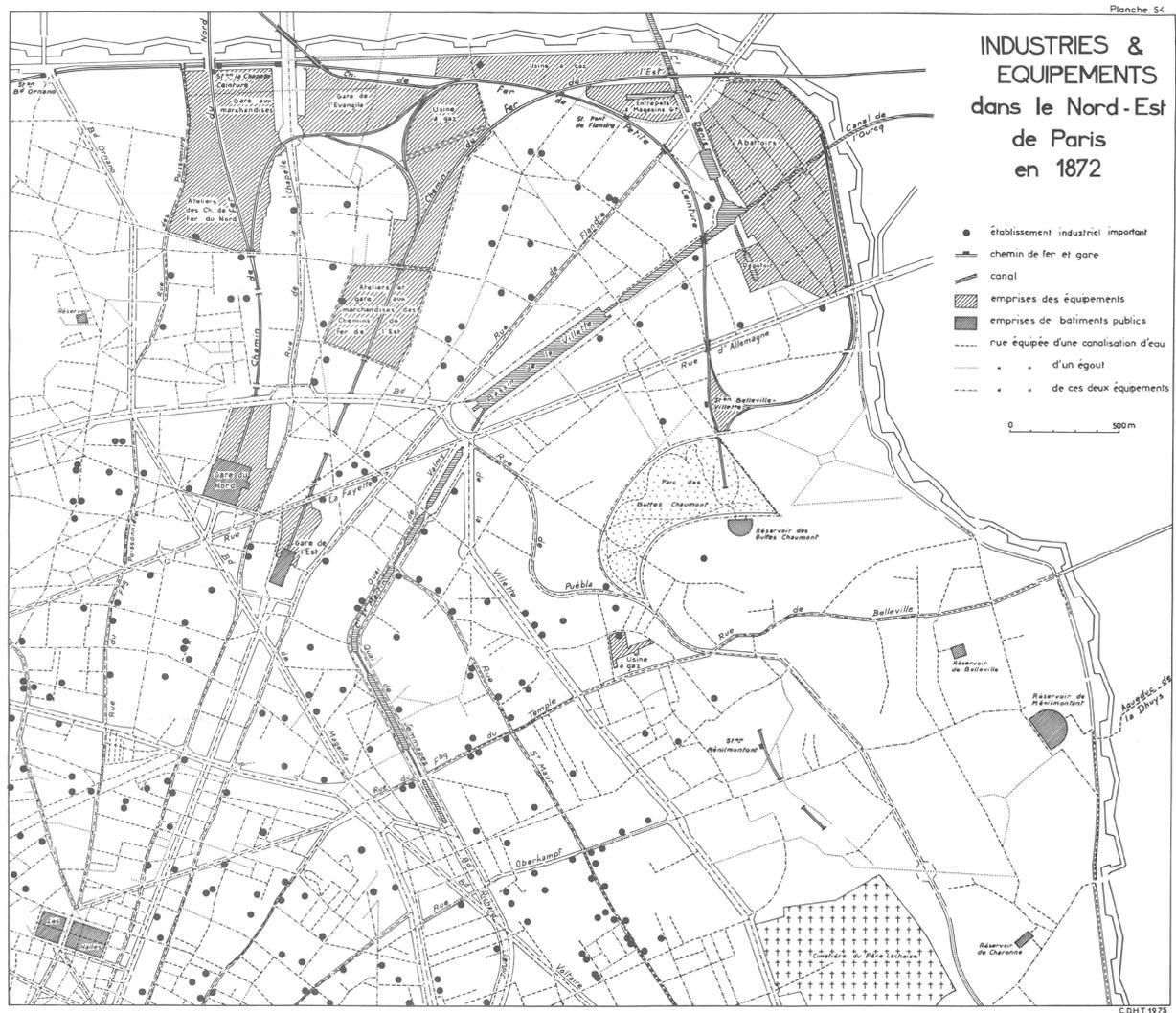


illustration 13 Paysage de l'énergie locale - vue extraite de l'atlas photographique de la Compagnie Parisienne d'Éclairage et de Chauffage par le Gaz – 1878 – Archives de la Ville de Paris.

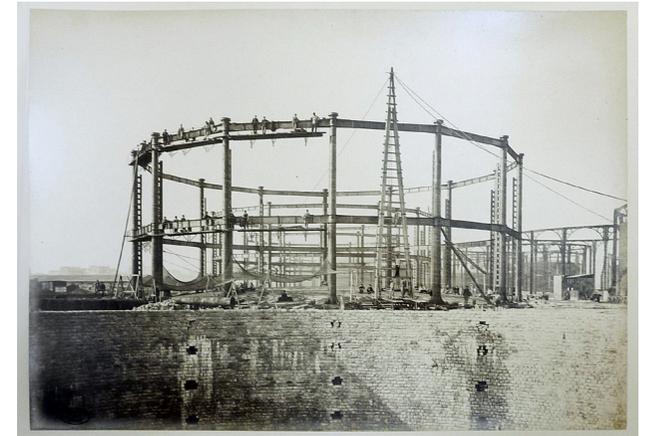


illustration 14 Paysage de l'énergie locale - vue extraite de l'atlas photographique de la Compagnie Parisienne d'Éclairage et de Chauffage par le Gaz – 1878 – Archives de la Ville de Paris

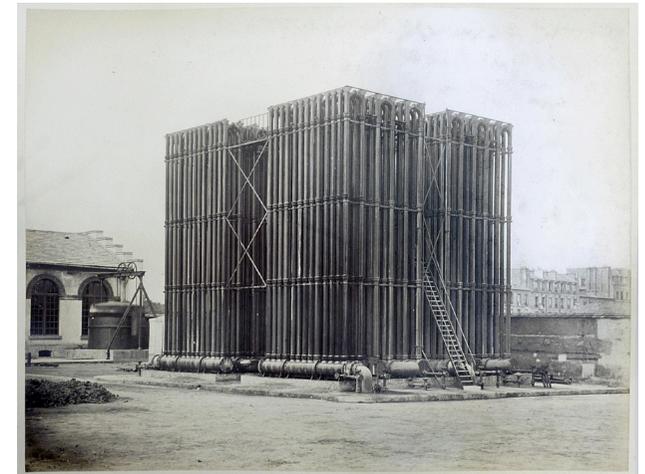


illustration 15 Atlas Daumas 1976 – planche 38 – équipement et prix des immeubles vers 1900 – carte 2 : immeubles éclairés par le gaz

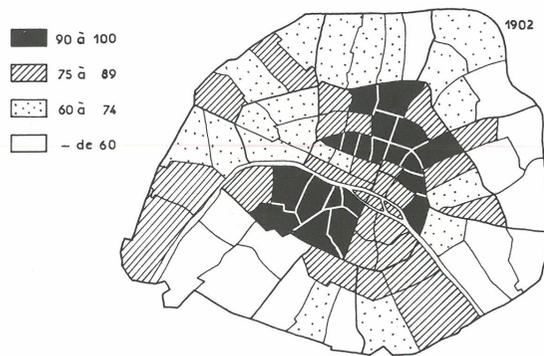


illustration 16 Atlas Daumas 1976 – planche 38 – équipement et prix des immeubles vers 1900 – carte 5 : immeubles éclairés par l'électricité



illustration 17 Atlas Daumas 1976 – planche 47 – électricité – carte 2 : immeubles éclairés par l'électricité – consommation d'électricité en 1903



EGOUTS CONSTRUITS DE 1855 A 1878

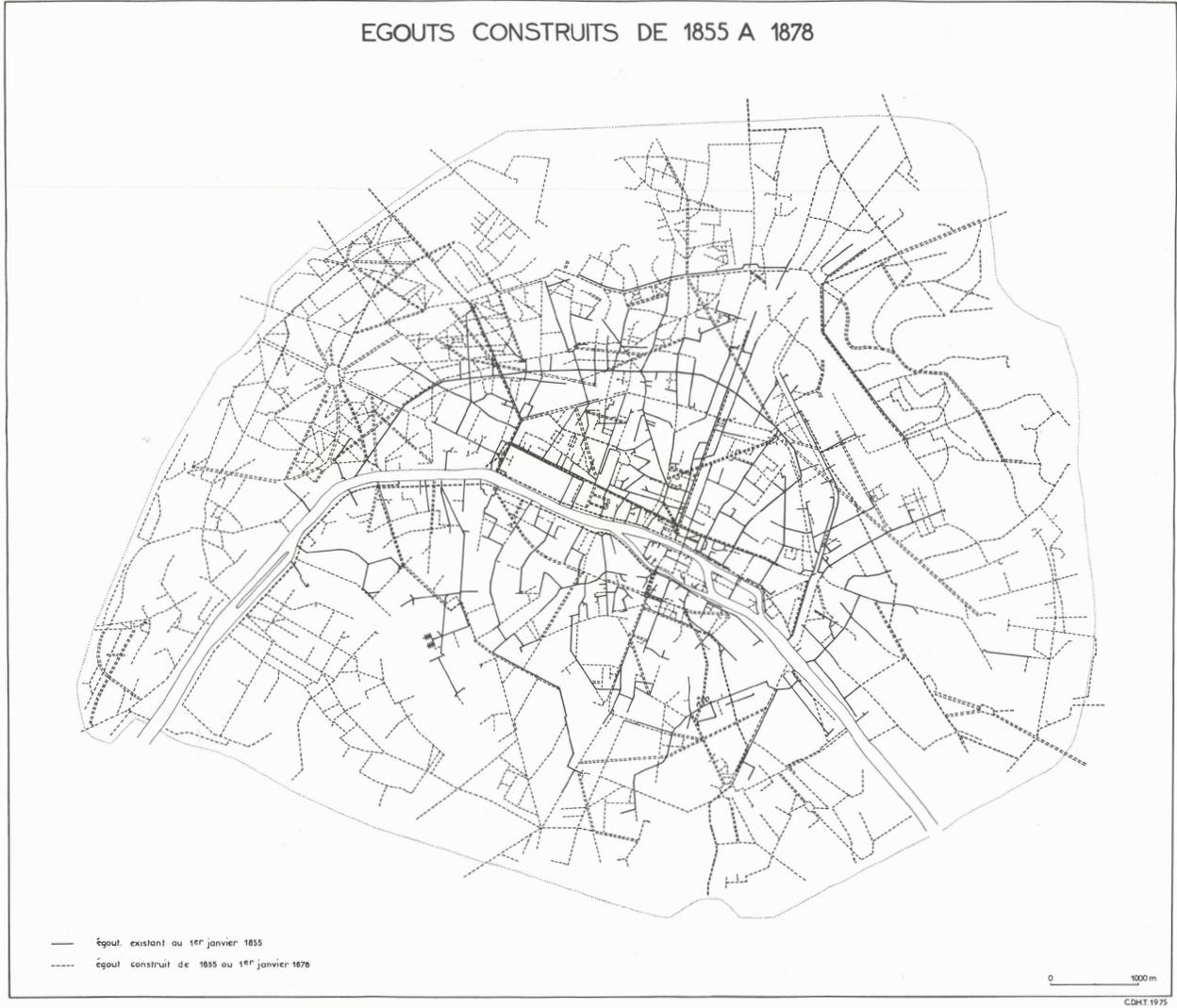


illustration 18 Atlas Daumas 1976 – planche 40 : égouts construits de 1855 à 1878.

Mais ces TEPOS seront-ils dépendants de la proximité des gisements énergétiques locaux? Pour aider sur cette délicate question nous avons **cartographié ces « gisements locaux »**.

3.2 Atlas des gisements énergétiques parisiens

3.3 Nous sommes pour la constitution d'atlas de gisements énergétiques dans les territoires, en général et en particulier dans les métropoles urbaines.

A partir de nombreuses sources nous avons donc élaboré un premier atlas sur les énergies disponibles actuellement mais également crédibles dans un futur proche (une à deux décennies) à Paris et parfois dans son environnement proche. Soulignons qu'il s'agit ici avant tout de « **gisements énergétiques** ». Qu'entendons-nous par « **gisement** » dans le cadre de cette prospective? On trouvera d'utile acceptation de cette notion essentielle dans les Cahiers d'Acteurs de la transition énergétique de 2013. Mais il est important de placer cette notion

dans une perspective théorique plus large qui prend bien en compte une dimension spatiale et partant de cela une dimension territoriale. Pour cela notre proposition est d'établir un parallèle entre « élément d'architecture » et « gisement énergétique ». Nous affirmons que le gisement (énergétique, la ressource en énergie) joue à l'échelle de la ville le même rôle fondateur que « l'élément » (d'architecture) joue à l'échelle de l'édifice.

Les **gisements** énergétiques sont ainsi fondateurs d'un territoire. Comme les **éléments** d'architecture sont fondateurs pour l'architecture de l'édifice.

Précisons ce parallèle entre « élément » et « gisement » : le mot « élément » est ici à entendre dans la perspective de Gottfried Semper¹¹ pour qui le

11 Gottfried Semper "Du style et de l'architecture – écrits, 1834 – 1869 " Ed. Parenthèses – collection Eupalinos – Marseille 2007.

Voir particulièrement le principe fondateur d'adossement des 3 autres éléments au premier, le foyer, page 125 : "C'est l'élément le plus ancien et le plus important – l'élément moral de l'architecture. Autour de lui gravitent trois autres qui

foyer constitue l'un des quatre éléments fondamentaux de l'architecture de l'édifice. Ce que nous tend pour nous l'importance donnée à cette notion de « gisement » c'est avant tout un changement d'attitude : nous devons passer de la **consommation d'énergie** non renouvelables à l'**optimisation des gisements** renouvelables locaux.

Les Plans Locaux Énergie Territoriaux (PCET) en cours de préparation vont contribuer au développement de la cartographie qualitative et quantitative sur les énergies locales : solaires, géothermiques, éoliennes, chauffage urbain en priorité.

Des cartes sont montrées ici, situant nos 9 cas d'étude par rapport à des gisements énergétiques locaux. Elles sont réalisées spécifiquement dans le cadre de cette recherche à partir des sources disponibles jusqu'à mi 2013. Elles synthétisent des données accessibles mais très dispersées. Une des dif-

font pour ainsi dire les entités protectrices qui protègent la flamme du foyer contre les trois éléments naturels : le toit, la clôture et le terre-plein."

difficultés rencontrées a été d'harmoniser ces cartes par une charte graphique les rendant compatibles entre elles. Il s'agit de pouvoir les superposer pour croiser leurs analyses. Nous comptons beaucoup sur cette plus-value cognitive liée à la combinatoire rendue possible par la cartographie numérique interactive. Divers formes de cartographies interactives sont déjà bien présentes sur la toile.

La cartographie interactive mise en ligne développée récemment par l'IAU d'Île de France (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme) est remarquable pour son ergonomie et sa précision¹².

La cartographie déjà en ligne de l'AIGP est un très bon exemple¹³ d'une cartographie utile à la prospective. Elle rend enfin accessible simultanément des cartes de données existantes et de projets à venir,

¹² http://www.iau-idf.fr/fileadmin/user_upload/Enjeux/MGP/cartomgp/index.html - consultation le 15 avril 2014

¹³ Consultation de la très riche cartographie interactive de l'AIGP le 15 avril 2013

et ceci, fait marquant, à plusieurs échelles combinées.

Nous avons testé notre cartographie des gisements énergétiques par une mise en ligne provisoire à titre de test¹⁴. Elle est consultée depuis novembre 2013 par de nombreuses personnes. Les retours sur ce test nous permettent et d'affiner nos cartes et de les compléter¹⁵.

¹⁴ http://www.th1-agence.fr/th6_ignis_grand_paris.php - Consultation du 15 avril 2014.

¹⁵ Les analyses de la consultation de cette cartographie interactive montrent une fréquentation d'environ 600 visites en 3 mois, avec environ 500 consultations uniques (mesures sur google adword).

Les 10 cartes des gisements énergétiques parisiens.

Nous les présentons dans l'ordre d'une coupe sur le territoire, du haut vers le bas :

- carte 1 : le gisement solaire,
- carte 2 : l'éolien,
- carte 3 : la chaleur fatale des data centers
- carte 4 : la biomasse,
- carte 5 : l'hydraulique,
- carte 6 : le CPCU, chauffage urbain (avec ses différents combustibles),
- carte 7 : le froid avec le réseau de Climespace,
- carte 8 : les eaux usées (les égouts),
- carte 9 : la chaleur fatale des réseaux des métros et des RER,
- carte 10 : la géothermie.

Carte 1 : le gisement solaire.

Ce gisement est traduit ici par la reprise de l'important cadastre solaire mis en place par la Mairie de Paris¹⁶. La représentation s'arrête aux limites parisiennes mais uniquement parce que ce cadastre n'est pas encore disponible sur la banlieue même si il est en cours d'élaboration.

Nous ferons d'ailleurs un usage très précis des données rendues disponibles par ce cadastre solaire pour nos prospectives détaillées.

Il est à noter que ce cadastre fait figure de prototype pour élaborer une cartographie interactive des gisements énergétiques locaux, accompagnée de données quantitatives exploitables par des projets à l'échelle de la parcelle.

16 Carte solaire extraite de la source : <http://www.cadastresolaire.paris.fr>



Légende:

Équipements à l'étude

Potentiel solaire sur surfaces existantes:

Élevé
Moyen
Faible
Très faible

Carte 2 : l'éolien.

La Région Île-de-France a établi un "schéma régional éolien en juillet 2012. Également l'ARENE d'Île-de-France - Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Énergies a fait un atlas éolien¹⁷.

Nous avons utilisé les différentes études disponibles en synthétisant les données qui restent à ce stade très imprécises. Les effets de masque et de turbulences sont très importants à considérer pour l'évaluation des rendements potentiels. Aussi nous avons privilégié pour cette carte une représentation des gisements à une altitude « raisonnable » pour ce type d'énergie, de 30 à 60 mètres de hauteur. La topographie générale et le couloir de la Seine sont ainsi bien lisibles. Mais les ensembles monumentaux historiques avec leurs larges dégagements perspectifs jouent aussi un rôle lorsqu'ils sont combinés avec les orientations des vents dominants.

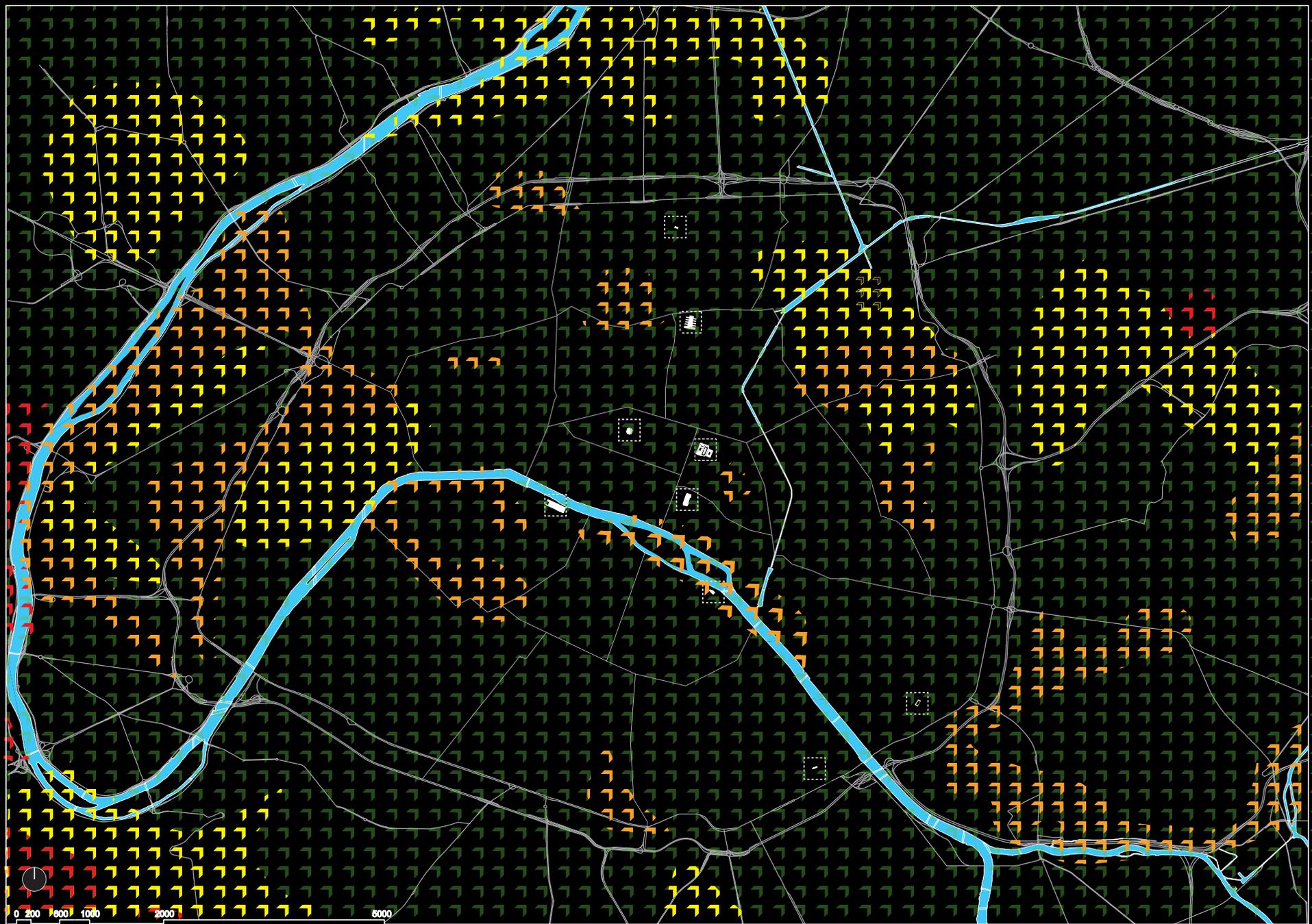
¹⁷ Cet atlas est disponible sur : <http://www.arenidf.org>

Nous avons dû combiner plusieurs sources pour pallier au manque de précisions des sources cartographiques sur Paris intramuros. Nous avons ainsi mis à contribution les documents suivants :

- le Schéma Régional Éolien en Île-de-France élaboré par la Région Île-de-France,
- L'Atlas Éolien pour l'Île-de-France, par élaboré l'Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Énergies (ARENE) Île-de-France,
- enfin de quelques données techniques issues du Syndicat des énergies renouvelables, France énergie éolienne.¹⁸

18 On consultera notamment :

- Région Île-de-France, schéma régional éolien en Île-de-France, 2012, 30 p.
- GUAL STATOÉOLIEN, Documentation technique sur les modèles stato-éoliens.
- Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies (ARENE) Île-de-France, Atlas Éolien pour l'Île-de-France, disponible sur «<http://www.arenidf.org>»
- Syndicat des énergies renouvelables, France énergie éolienne, L'Éolien en Île-de-France, Rapport, 2011, 11 p.



Légende:

□ Equipements à l'étude

↖ Potentiel éolien très faible (entre 50 et 100 W.m² pour les hauteurs de 30 à 60 mètres)

↗ Potentiel éolien moyen/faible (entre 100 et 130 W.m² pour les hauteurs de 30 à 60 mètres)

↘ Potentiel éolien moyen (entre 130 et 160 W.m² pour les hauteurs de 30 à 60 mètres)

↙ Potentiel éolien élevé (plus de 160 W.m² pour les hauteurs de 30 à 60 mètres)

Carte 3 : la chaleur fatale des data centers.

Les data centers sont des nouveaux programmes issus du développement des NTIC. Ils dégagent une chaleur fatale très importante qui est récupérable par des pompes à chaleur. Un dispositif de ce type est déjà opérationnel à Marne-la-Vallée pour chauffer des bâtiments au alentour du data center¹⁹.

Nous avons cartographié l'emplacement actuel et ceux prévus à court terme dans le cadrage de notre cartographie²⁰. Il est remarquable que la distribution territoriale de ces data centers soit relativement ho-

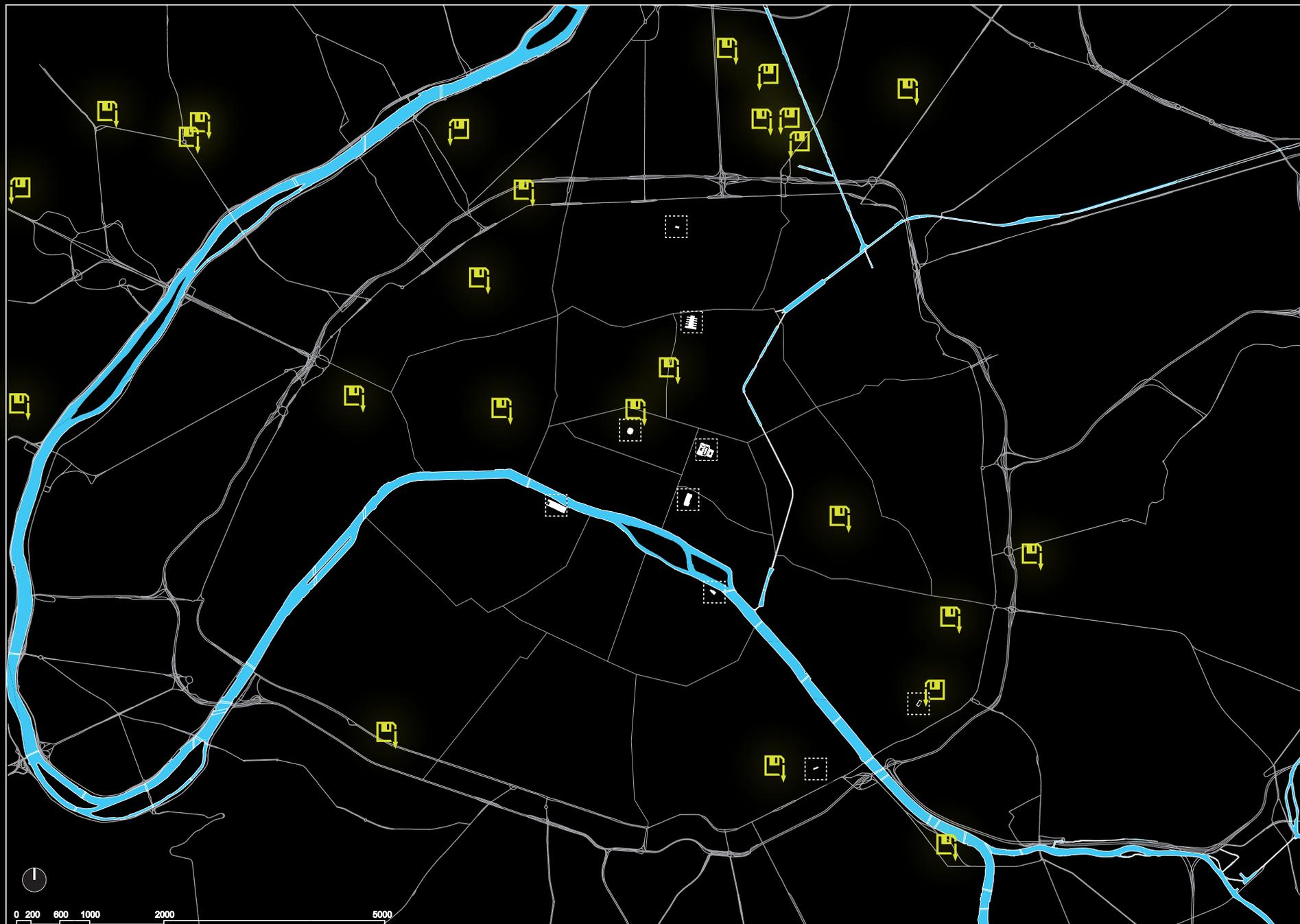
19 voir l'application de ce « métabolisme urbain » à Marne-la-Vallée : <http://www.batiactu.com/edito/quand-l-informatique-sert-aussi-a-se-chauffer-35613.php> - consultation le 15 avril 2014. Cette installation de la ZAC du Prieuré fournira environ 26 GWh de chaleur par an à 600 000 m² de bâtiments répartis sur 150 ha.

20 Voir les données extraites du site : WWW.DATACENTER9.COM pour la localisation des data centers français communiqués, 2013. Il est à noter que ces données sont accessibles sur ce site simultanément à des échelles mondiale et ultra locale en quelques clics.

mogène, intra et extra muros de Paris. Leur programmation avec des groupes d'immeubles à chauffer non desservis actuellement par le CPCU apparaît possible.

En prospective l'interprétation de la tendance vis-à-vis de cette énergie récupérée n'est pas consensuelle. L'hypothèse de cette récupération d'énergie n'apparaît pas pérenne pour certains car elle est très sensible aux évolutions de l'organisation territoriale du numérique et à la virtualisation des serveurs : aura-t-on encore besoin de grands data centers d'ici 10 ans? Aussi il est difficile de baser des calculs de retour sur investissement avec ces équipements. Toutefois ce programme de data center est pour nous emblématique : il résume bien cette catégorie de programme logistique qui engendre une chaleur fatale récurrente, disponible directement pour le chauffage des bâtiments du contexte proche. Il s'agit des centres commerciaux, des multiplex... L'adossement de ces programmes fortement consommateurs en énergie, avec des fonctions d'habitation et de bureaux est une clé majeure pour

reconfigurer les futurs équipements et services collectifs de la métropole.



Légende:

Équipements à l'étude

Data centers

Carte 4 : la biomasse.

Nous avons représenté à partir des données de la Ville de Paris la strate arborée, boisements, alignements d'arbres et autres sujets dans les squares²¹. Il s'agit ici de mesurer la présence ou non d'une biomasse significative au niveau ultra local.

Cette énergie est très controversée dans le milieu urbain parisien. Elle a été consommée pendant les crises majeures comme combustible de dernier recours (siège de Paris hiver de 1870 à 1871).

Les recommandations et règlements actuels limitent strictement l'usage des poêles à bois par exemple pour contribuer à une meilleure qualité de l'air.

Les études effectuées notamment dans le cadre du SRCAE (Schéma Régional Climat Air Énergie) s'intéressent à la biomasse essentiellement pour la filière

21 Atelier Parisien d'Urbanisme, données cartographiques (SIG) des arbres propriété de la Ville de Paris

biomasse combustion. Il s'agit de « définir des objectifs prospectifs franciliens de substitution des énergies fossiles par de la biomasse combustion et établir un programme de soutien et de développement de la filière biomasse combustion avec l'ensemble des acteurs de la filière. »²²

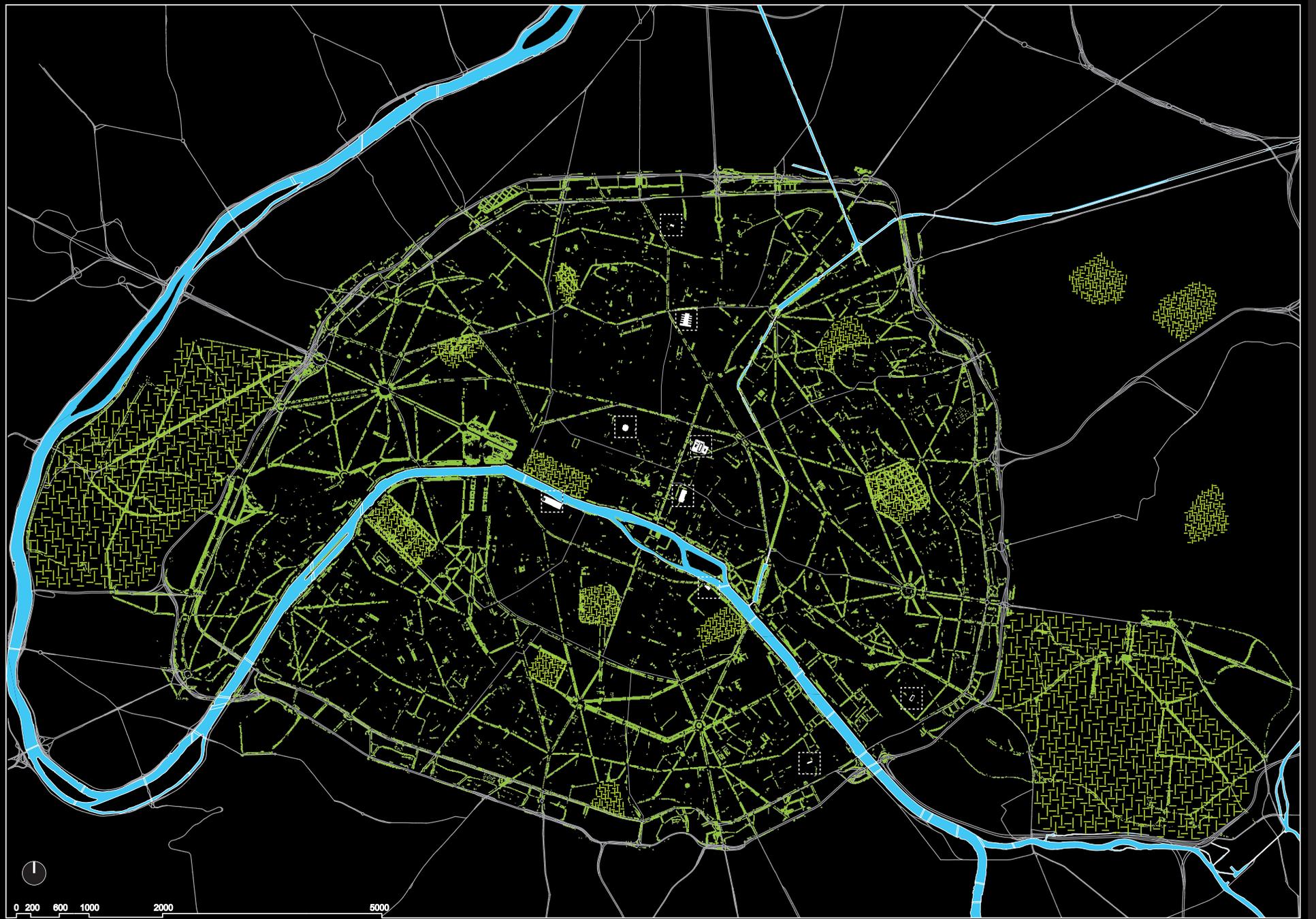
L'étude de 2010 ne considère pas qu'il existe un gisement « domestique » dans Paris intramuros.

« Le périmètre de l'étude concerne les usages chaleur et cogénération de la biomasse dans les secteurs résidentiels collectifs, tertiaires et industriels. Sont donc exclus les usages chaleur de la biomasse dans le secteur domestique (bois bûche principalement). Cependant la problématique de la combustion de la biomasse dans le secteur domestique mérite une attention particulière dans la mesure où les

22 «SYNTHESE de l'étude préalable à l'élaboration du volet combustion de la Biomasse en filière collective du Schéma Régional Climat Air Énergie (SRCAE) d'Ile-de-France », BET Inddigo, juillet 2012, Région Ile-de-France / ADEME, 36 p.

émissions de polluants atmosphériques résultant de la combustion du bois émanent à l'heure actuelle principalement de ce secteur. »

Donc ce gisement demanderait pour être exploité de manière « ultra locale » la mettre en place de la collecte fine de bois, lors des élagages par exemple, la plantation de boisements nouveaux dans la ville avec des essences à croissance rapide. L'évaluation de la quantité d'énergie rendue ainsi consommable sur place n'est pas faite à ce stade de la recherche.



Légende:

□ Équipements à l'étude

— Biomasse bois propriété de la ville de Paris

■ Parcs et jardins avec potentiel de culture biomassique important

Carte 5 : l'hydraulique.

Le gisement parisien est tributaire du courant de la Seine. Nous nous sommes documentés grâce à la consultation restée sans suite à ce jour de la Ville de Paris et des Voies Navigables de France pour installer des hydroliennes dans Paris²³.

« La Seine constitue un terrain d'expérimentation spécifique pour le développement d'hydroliennes à faible vitesse de déclenchement (vitesse supérieure à 1,0 m/s). La Ville de Paris et Voies Navigables de France souhaitent, en partenariat avec l'Institut de Physique du Globe de Paris et Paris Région Lab, mettre en oeuvre une zone d'expérimentation pour le développement, la mise en oeuvre et la maintenance d'hydroliennes fluviales. Ces expérimentations pourront se dérouler sur la base d'une autori-

23 Mairie de paris (Direction des Espaces Verts et de l'Environnement) + Voies Navigables de France ; "DOSSIER DE CONSULTATION : Expérimentation d'hydroliennes dans la Seine ou de tout dispositif de production d'énergie électrique à partir de la force motrice du fleuve.", septembre 2010, 17 p.

sation d'occupation temporaire de 1 an minimum renouvelable 3 fois au maximum. L'objectif de la Ville est que l'expérimentation commence début 2011. Quatre sites ont été identifiés par la Ville de Paris et Voies Navigables de France pour une implantation possible d'hydroliennes dans le cadre du présent appel à projets. »²⁴

Les lieux d'implantation potentiels au moment de cette consultation en 2010 étaient les suivants : - au Pont du Garigliano, côté rive droite, avec une profondeur d'eau de 4 à 5 mètres,

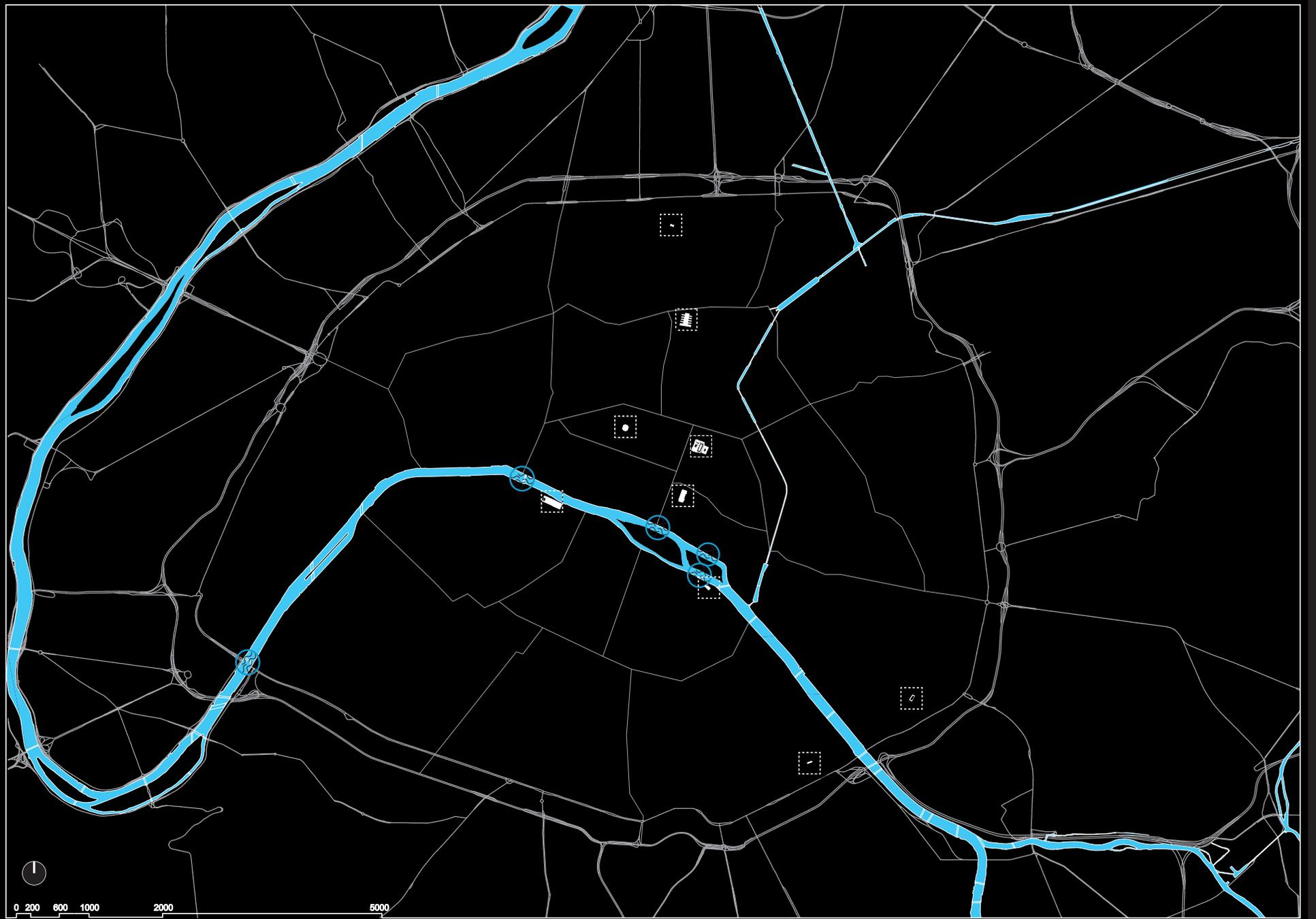
- au Pont de la Tournelle du côté de l'Île Saint Louis, avec une profondeur d'eau d'environ 4 mètres,

- au Pont Marie du côté de l'Île Saint Louis, en rive droite avec une profondeur d'eau d'environ 2,5 mètres.

- au Pont au Change côté rive droite,

24 Op. cit. page 3.

avec une profondeur d'eau d'environ 3,5 mètres.



Légende:

□ Équipements à l'étude

● Potentiel mineur d'énergie hydraulique

Carte 6 : le CPCU, chauffage urbain (avec ses différents combustibles).

Cette carte doit beaucoup au SIG de l'APUR - Atelier Parisien d'Urbanisme. On se reportera au document "Les réseaux de chaleur à Paris et en petite couronne" de novembre 2006²⁵. Ce réseau se développe encore. Mais le rythme de développement est bien moindre que celui des décennies de la fin du XX^{ème} siècle. La tendance lourde sur laquelle le SRCAE se positionne consiste à miser sur un développement important du Chauffage Urbain et ce malgré la baisse de consommation du chauffage lié à l'amélioration de l'isolation par exemple.

On se reportera utilement au rapport de 2012 de la DRIEE (Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie) qui évalue préci-

²⁵ "Les réseaux de chaleur à Paris et en petite couronne" novembre 2006, 18 p. Voir également le site : <http://www.cpcu.fr>

sément ces développements potentiels.²⁶

Il est intéressant de resituer les objectifs de cette étude parmi lesquels figure en bonne place l'objectif cartographique : « cette étude avait pour objectif de réaliser un recensement précis et une analyse des données sur les réseaux de chauffage urbain franciliens, d'élaborer un Système d'Information Géographique (SIG), de déterminer les potentiels de raccordements supplémentaires possibles en région et d'identifier les freins et opportunités (réglementaires, financiers et techniques) pour le développement des réseaux de chaleur. Ses principaux résul-

²⁶ Direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie (DRIEE), Évaluation du potentiel de développement du chauffage urbain en île-de-France, Document d'analyse réalisé à partir de l'étude sur les réseaux de chaleur contributive à l'élaboration du Schéma Régional Climat Air Énergie, 2012, 69 p. Cette étude a été confié à un groupement de prestataires formé par SETEC (Partenaires Développement - mandataire - et Cadet International) et les cabinets MAZARS, STRATONAL Finances et De CASTELNAU.

tats ont été intégrés au projet de SRCAE. »²⁷

²⁷ Op. cit., page 3.



Légende:

Equipements à l'étude

- Chauffage ordures ménagères et fossile
- Chauffage tout fossile
- Chauffage géothermie et fossile

- Centre de production de chauffage urbain "fossile" (Fuel, charbon ou gaz)
- Cogénération (production élect. et recyclage chaleur)
- Centre de production CPCU "UIOM" (Usine d'incinération d'ordures ménagères)

Centre de production CPCU "Géothermie"

Carte 7 : le froid avec le réseau de Climespace

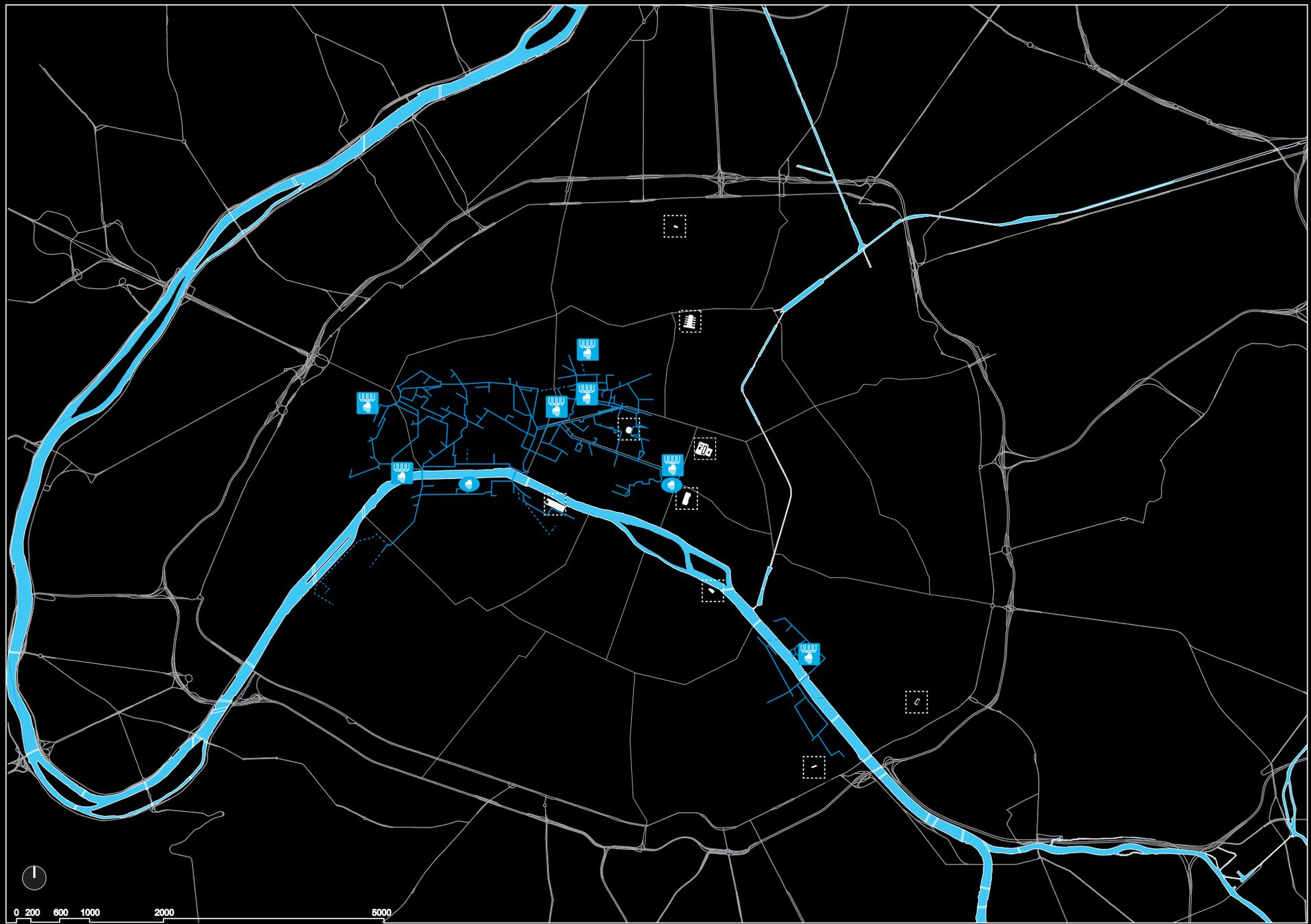
Le “froid” est vu ici comme une énergie disponible à partir d’un réseau de fabrication et distribution d’eau glacée en place dans Paris. Ce réseau de Climespace est remarquable à de nombreux titres.²⁸ Cette société est leader en Europe sur ce type de production.

Ce réseau est actuellement basé sur les quartiers centraux à forte présence d’activités tertiaires. Le réchauffement climatique en cours laisse présager que un développement des besoins de climatisation dans Paris intramuros.

28 Voir sur le réseau Climespace :

- Climespace (<http://www.climespace.fr>), carte du réseau de froid.

- Documentation réseau de chaleur et réseau de froid, Centre d’Études Techniques de l’Équipement de l’Ouest et Ministère de l’Écologie, de l’Énergie, du Développement Durable et de la Mer, 2 p.



Légende:

□ Équipements à l'étude

— Réseau frigorifique existant

- - - Réseau frigorifique prévisionnel à court terme

☑ Centrale de production

● Réservoir de stockage

Carte 8 : les eaux usées (les égouts).

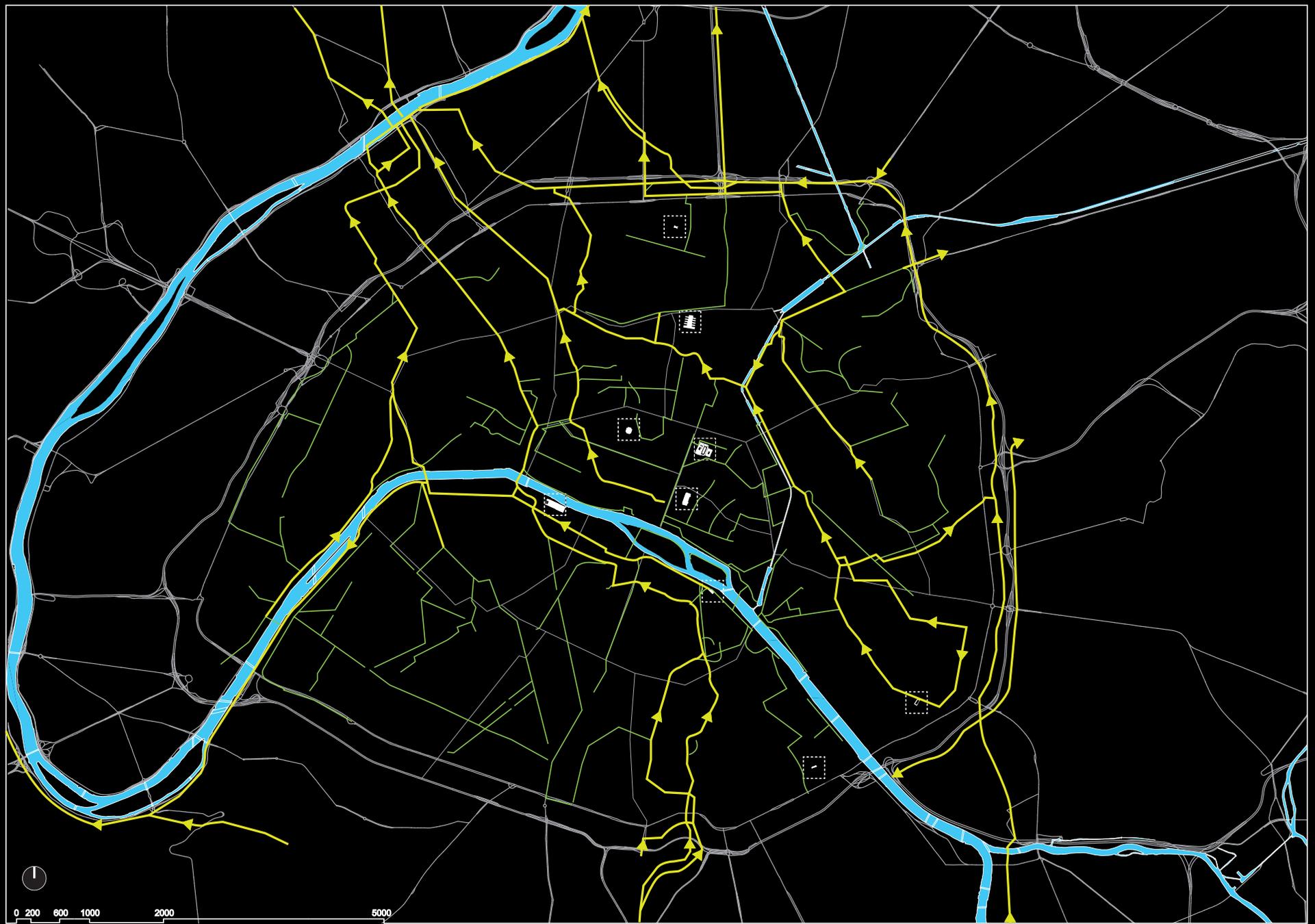
Nous avons eu quelques difficultés, étrangement, à réunir les données énergétiques qui peuvent être liées au réseau des égouts de Paris. Nous avons effectué des visites dans les archives dispersées en plusieurs endroits dans Paris. Nous avons systématiquement collectés les données des émissaires principaux et réseaux secondaires qui étaient dans le contexte proche de nos 9 cas d'études, ceci afin de pouvoir baser nos analyses à l'échelle du bâtiment.

Nous avons ainsi pu avoir accès aux différents types d'égouts qui sont installés à Paris. Leurs sections types sont, c'est bien connu, relativement généreuses et ont permis ainsi de faire passer d'autres réseaux dans celui des égouts. Les débits d'eau et les températures des effluents sont très souvent suffisants pour mettre en place des récupération de chaleur fatale avec des pompes à chaleur. L'exemple de l'école de Wattignies, étudié en détail par notre recherche, nous a documenté sur cette

technique et sur les premiers retours d'expérience²⁹. Dans cette première réalisation parisienne une soixantaine de mètres d'échangeur sont installés pour chauffer une école, ce qui donne une idée de l'échelle de la récupération de cette énergie renouvelable locale.

La carte montre une hiérarchie claire entre les collecteurs principaux et les égouts secondaires. Ce réseau est soumis à la logique gravitaire générale globalement dirigée vers le Nord. L'exploitation de cette chaleur fatale va demander une coordination d'ensemble pour le prélèvement de cette ressource.

29 Voir le richement illustré dossier de presse d'avril 2011, diffusé par la Mairie de Paris et le CPCU : «Énergies renouvelables : un groupe scolaire parisien chauffé grâce à la chaleur des égouts », Mairie de Paris, avril 2011



Légende:

- Équipements à l'étude
- Collecteurs principaux
- Collecteurs secondaires

Carte 9 : la chaleur fatale des réseaux des métros et des RER.

La récupération de la chaleur fatale de ce type de réseau, celui du transport en commun souterrain, est un objectif qui est dorénavant affiché pour le nouveau métro de la SGP. Il est évident que cet objectif est à l'étude à la RATP, même si actuellement des études de références ne nous ont pas été accessibles.

Nous avons donc cartographié le réseau des métros et des RER, mais dans leurs parties souterraines uniquement, fabriquant ainsi une carte inédite. Elle permet une lecture différente des lignes habituelles. L'excellent plan issu du PLU (Plan Local d'Urbanisme) des servitudes d'utilité publique est une base très suggestive pour comprendre l'extraordinaire présence de ces réseaux dans la ville de Paris³⁰.

30 Voir l'excellente carte figurant en rouge sur le plan de la ville les réseaux concernés : «**PLU de la Ville de Paris – version de juin 2006, Annexes, Servitudes d'utilité publique, Plan n°2 Utilisation de certaines ressources et**

Mais nous souhaitons insister sur l'infrastructure souterraine et ses émergences. Les points remarquables que constituent les émergences de ce réseau souterrain sont donc mis en valeur dans cette carte : à ces points singuliers, finalement relativement peu nombreux, pourraient être associée la visibilité de cette énergie fatale récupérée et recyclée.

Actuellement la construction des nombreuses nouvelles gares de la Société du Grand Paris fournit enfin l'opportunité d'étudier en détail les applications opérationnelles de cette énergie fatale récupérée dans les tunnels.

équipements – infrastructures aériennes et souterraines du Métro et du RER y compris les ouvrages de raccordement».



Légende:

- Équipements à l'étude
- Réseau ferré souterrain intramuros
- Entrée/sortie de réseau souterrain

Carte 10 : la géothermie.

La géothermie est une énergie remarquable en Île de France, par son exploitation largement développée et par son potentiel à venir.

Sans rentrer dans les subtilités des géothermies accessibles à différentes profondeurs nous avons voulu cartographier une synthèse et pouvoir contribuer à la réponse à une question apparemment simple : le territoire de Paris est-il marqué par des différences importantes en matière d'accès à cette énergie renouvelable? Nous nous sommes appuyés sur les très techniques rapports disponibles, notamment celui de l'ADEME de janvier 2012³¹. Nous arrivons à la conclusion, certes provisoire, que la géothermie n'est pas homogène sous Paris et qu'ainsi le potentiel d'accès à cette énergie devrait être coordonné

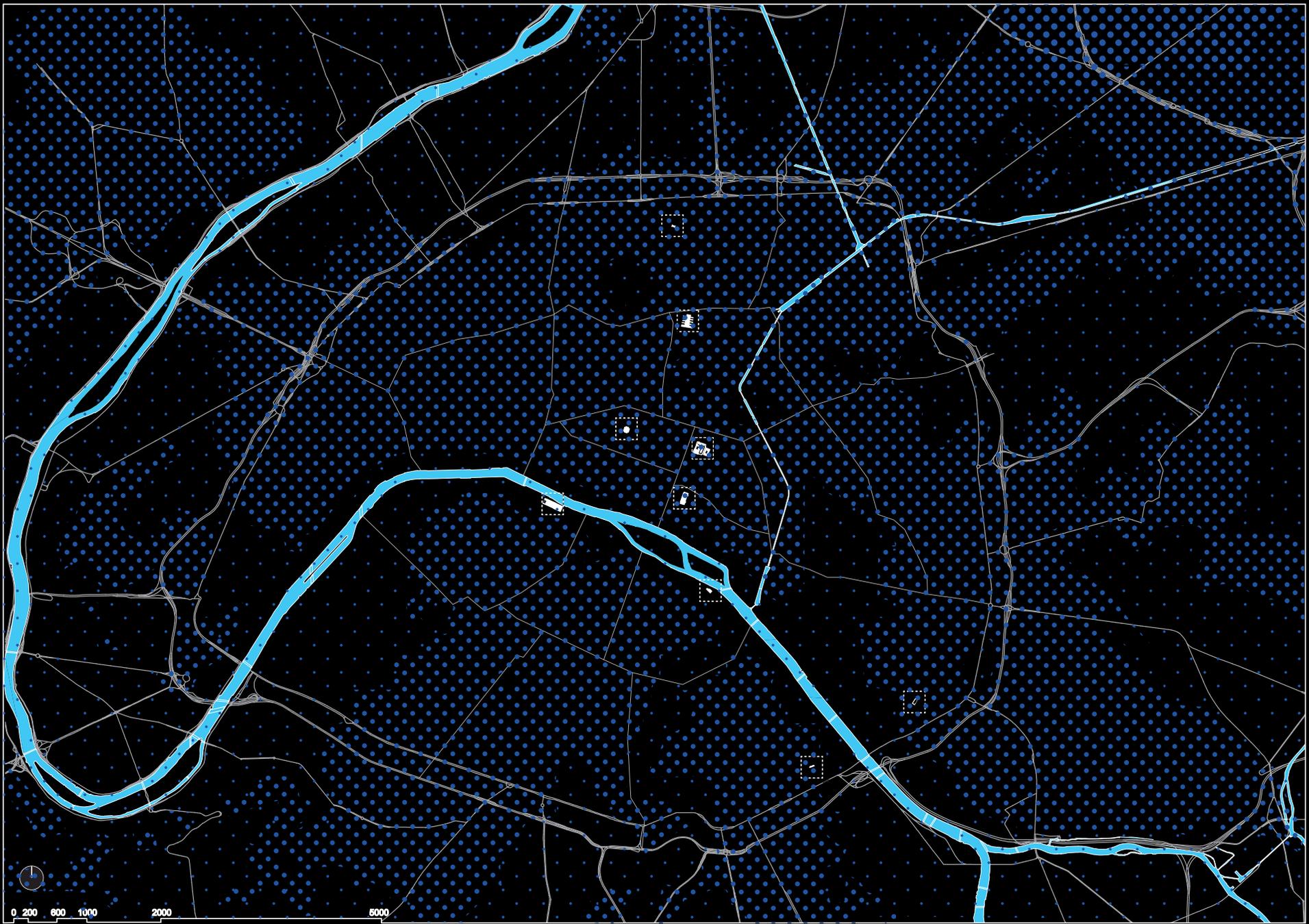
par les différents TEPOS de la ville de Paris.

En guise de conclusion provisoire sur cette cartographie.

Cette cartographie n'est pas exhaustive bien entendu. Elle n'est qu'une étape dans cette recherche et un exercice exemplaire pour simuler les enjeux à venir.

Elle a permis de tester l'intérêt d'unifier les données sur les gisements énergétiques. Cette unité de représentation permet d'imaginer leurs assemblages, leurs complémentarités. Ceci sera à la base des TEPOS à constituer.

31 "Synthèse de l'étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Île-de-France", rapport final, Bel A., Poux A., Goyénèche O., Allier D. Darricau G., Lemale J., ADEME; BRGM, Région Île-de-France, janvier 2012, 21p.



Légende:

- Equipements à l'étude
- Potential Géothermique très élevé
- Potential Géothermique élevé
- Potential Géothermique faible

illustration 29 Superposition de 9 cartes des gisements énergétiques, TH1 Villien



illustration 30 Relief des énergies locales à Paris, selon leur amplitude verticale, TH1 Villien

3.4 Typologie territorialisée des gisements énergétiques à partir de la coupe territoriale

Dans la diminution par 2 des besoins énergétiques d'ici à 2050 les TEPOS pourraient jouer un rôle crucial. Ils auraient une influence majeure sur la courbe de la baisse des besoins : la plus accentuée possible dès le départ.

Mais comment **territorialiser** au maximum nos gisements énergétiques? Il nous faut établir une typologie des gisements énergétiques qui soit opératoire et transcalaire.

La coupe territoriale sur les gisements énergétiques

La **coupe**, outil de l'architecte et de l'urbaniste, nous révèle des possibilités inédites pour établir cette typologie autre des gisements énergétiques locaux. Nous pouvons passer **de la coupe territoriale sur Paris à celle de l'édifice** : nous le ferons par l'étude de l'étagement des gisements énergétiques.

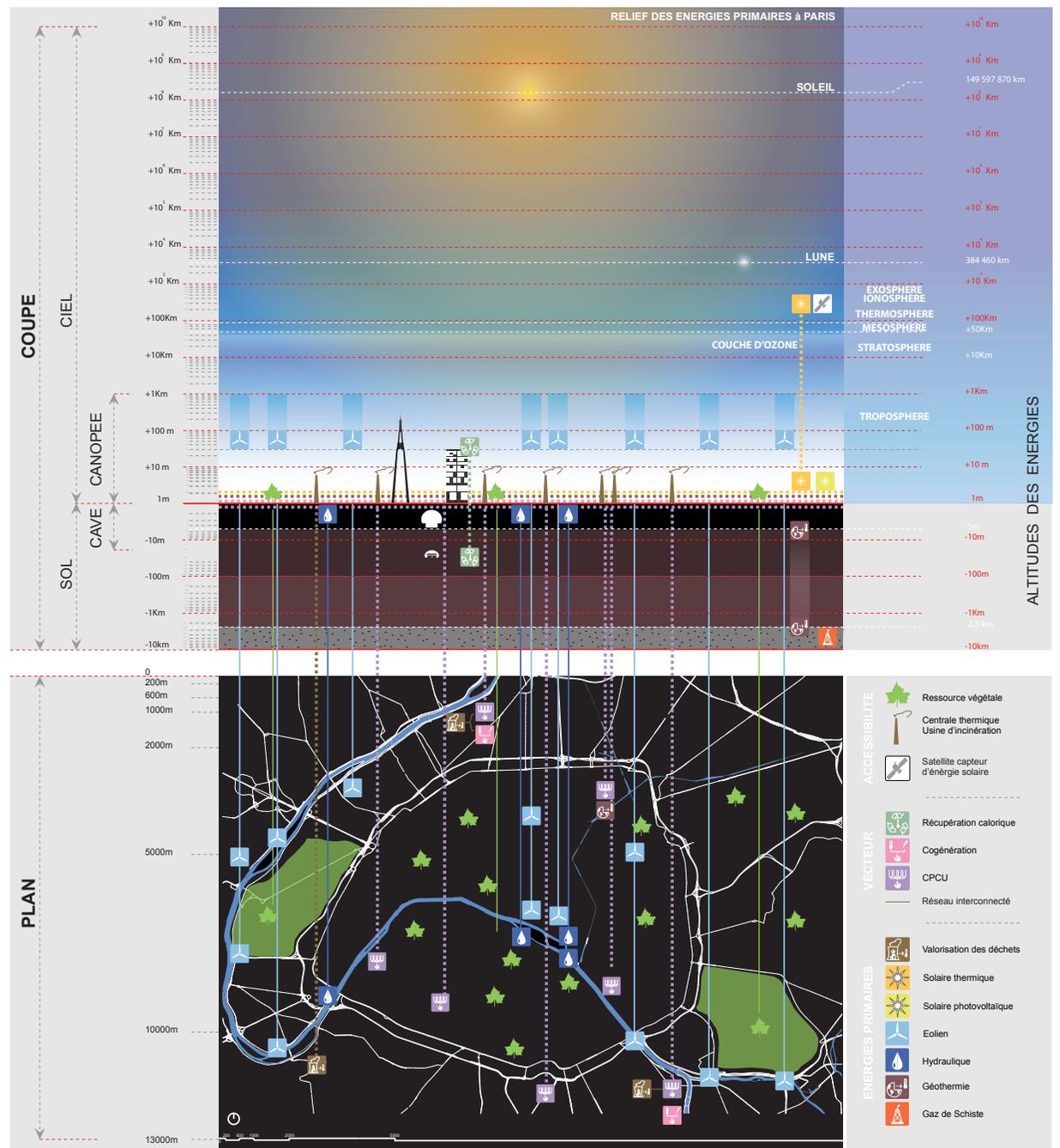
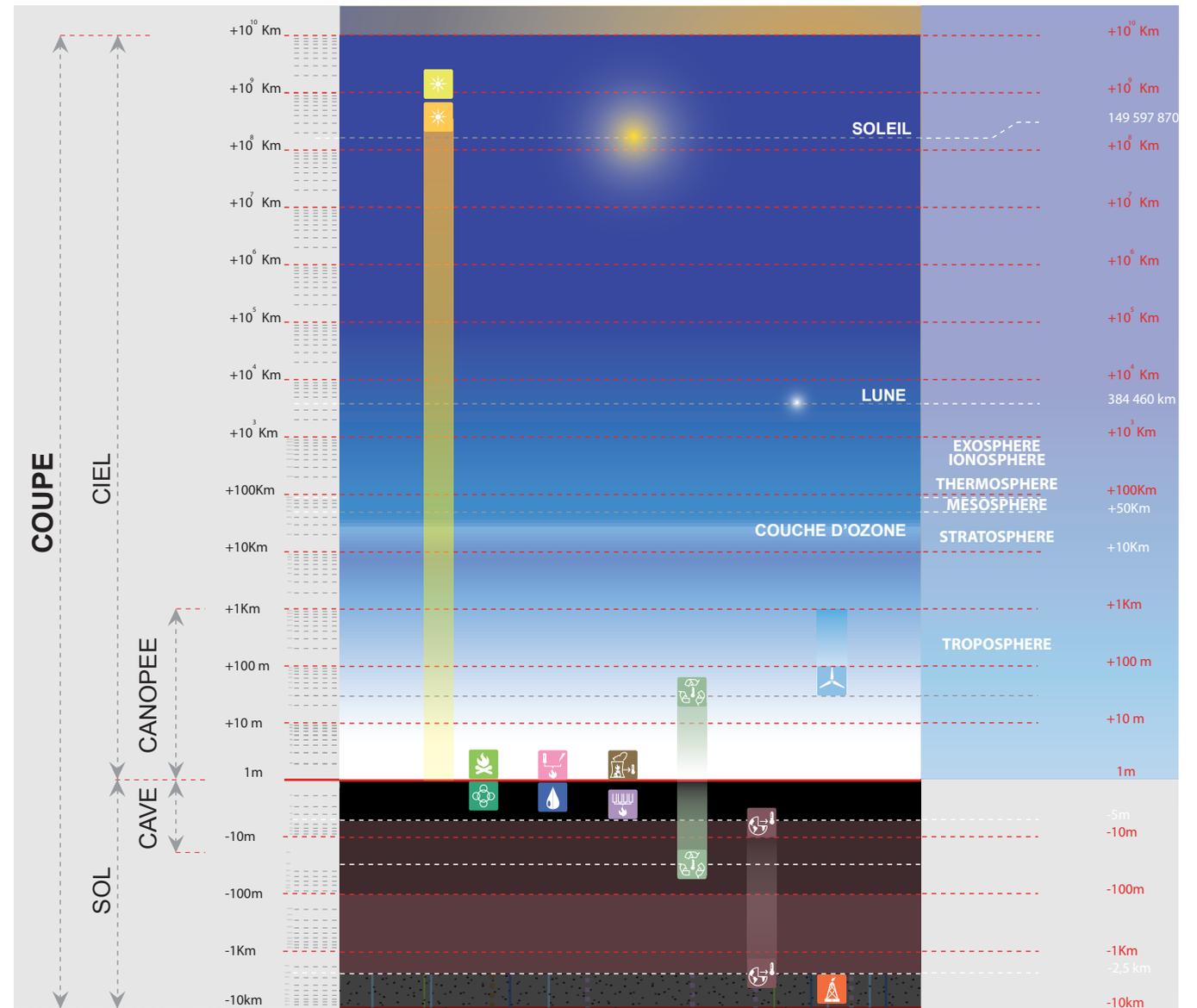


illustration 31 Coupe globale sur les gisements énergétiques, du sous-sol à la canopée, TH1 Villien

Le **séquençage vertical** est représenté ici en échelle logarithmique (un facteur 10 est appliqué à chaque unité successive).

Il permet de visualiser et de comprendre les étagements, les proximités et les éloignements verticaux.



3.5 Les 3 types de gisements énergétiques : les diffus, les poches et les flux

Notre typologie des gisements est élaborée à partir du séquençage vertical, elle en suit sa logique.

Lues ainsi, les énergies sont stockées et lisibles selon des formes classables par grands types.

3 types de gisements sont définis ici : les Diffus, les Poches, les Flux.

- Pour les types « diffus » : l'énergie est captée de manière singulière, par petites quantités et dans de multiples endroits. Essentiellement dans les parties supérieures de la coupe.

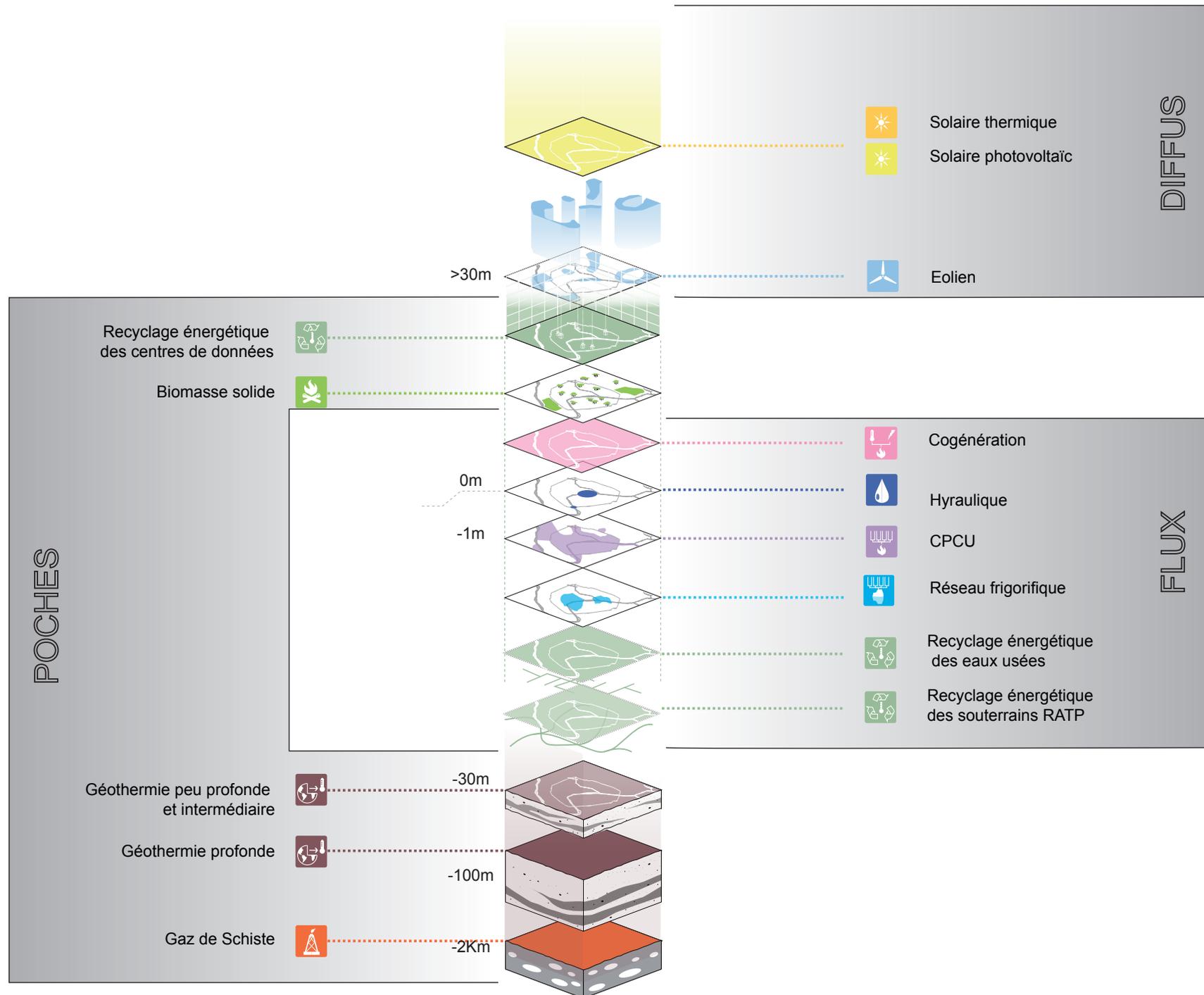
- Pour les types « poches » : l'énergie est là en volume, dans des formes et des placements très divers. Essentiellement en 2 séries, en strates aériennes intermédiaires et dans les profondeurs du sous-sol.

- Pour les types « flux » : l'énergie est contenue dans les réseaux existants : égouts, CPCU, ... essentiellement dans les strates proches du sol, dessus et dessous.

Ces 3 types de gisements énergétiques sont extrêmement utiles à un passage à l'échelle M.

Cette typologie énergétique est d'essence « territoriale ».

« De la cave à la canopée » : les coupes nous révèlent mieux que les plans l'importance d'une appréciation en volume des gisements énergétiques.



Type 1 : LES GISEMENTS ÉNERGÉTIQUES DIFFUS

Cette catégorie de gisement concerne les énergies omniprésentes mais dont la puissance varie selon le lieu de captage. Ces énergies se captent du sol à la canopée. Bien qu'elles soient les deux énergies renouvelables les plus connues du grand public le solaire et l'éolien, leur potentiel est fortement limité par les conditions du milieu urbain, notamment par les effets de masque.

Type 2 : LES GISEMENTS ÉNERGÉTIQUES SOUS FORME DE POCHE

Ces gisements sont des volumes de matière ou de chaleur dans lesquels il est possible de puiser. Ces énergies sont extraites de manières ponctuelles.

La GÉOTHERMIE avec son potentiel important. La BIOMASSE solide mais aussi alguale.

La RÉCUPÉRATION DE CHALEUR des fonctions urbaines spécifiques tels que les datas centers par exemple.

Type 3 : LES GISEMENTS ÉNERGÉTIQUES SOUS FORME DE FLUX

C'est là l'avantage énergétique majeur du milieu urbain. Si le captage d'énergie diffus y est limité, sa densité et ses réseaux structurés et généreux sont des atouts énergétiques actuellement très peu exploités.

Le CHAUFFAGE URBAIN bien sûr.

Mais aussi les ÉGOUTS avec leurs différents collecteurs principaux et secondaires.

Mais aussi le réseau du métro et des RER représente un gisement potentiel important avec la récupération de la chaleur dégagée par les freinages et les foules.

illustration 33 Typologie des gisements locaux classés en 3 familles : diffus, flux et poches, TH1 Villien

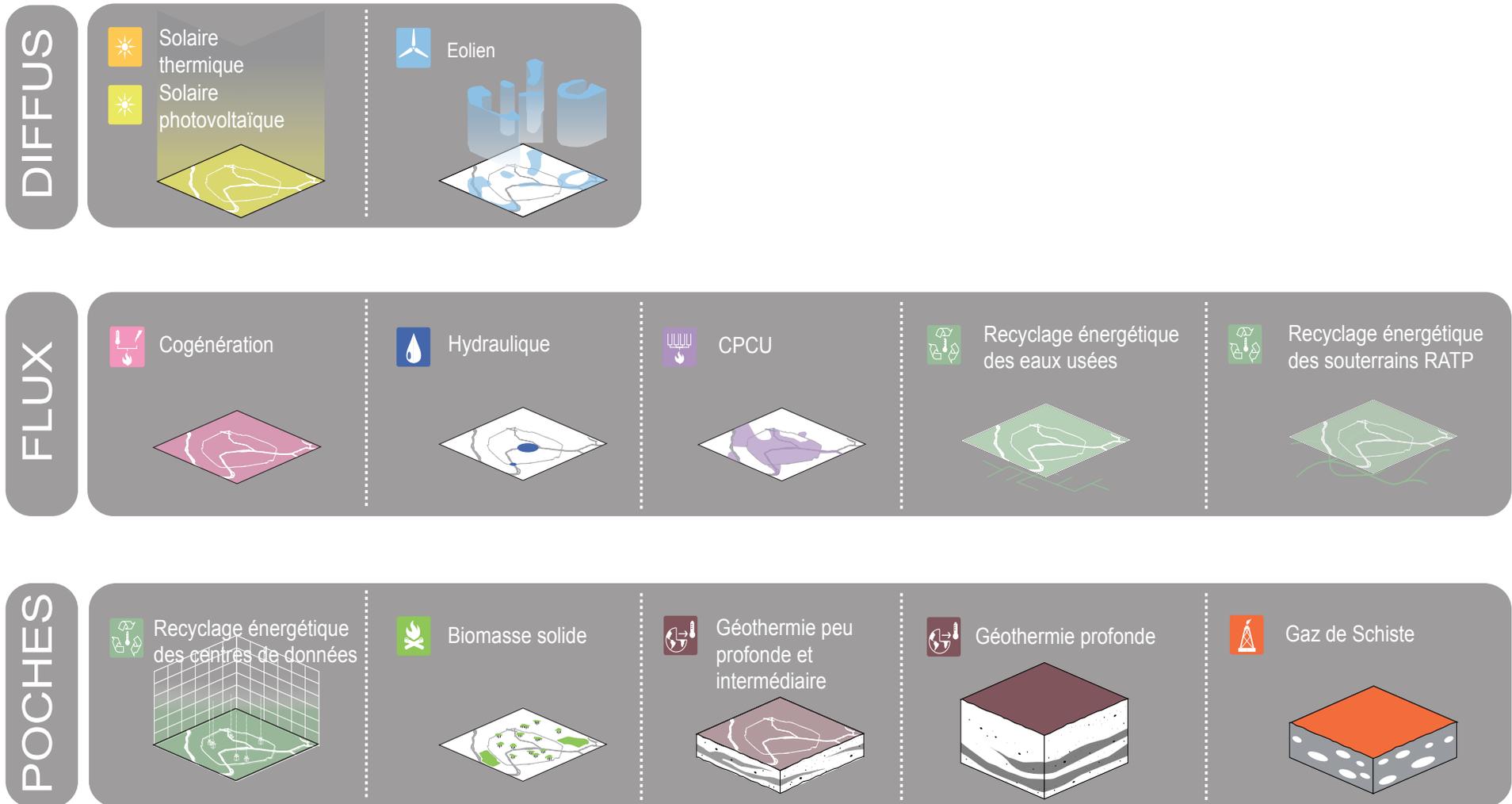
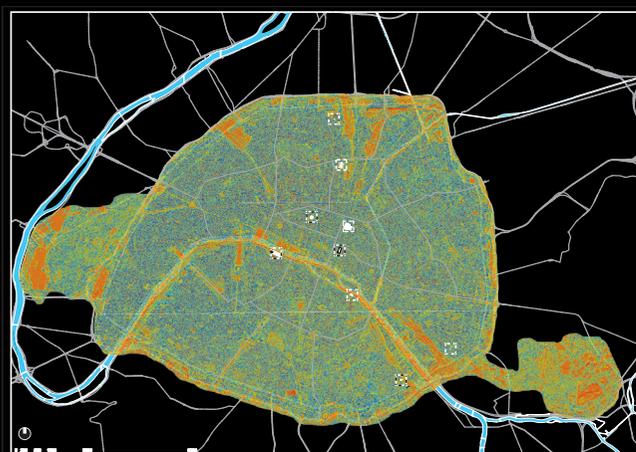
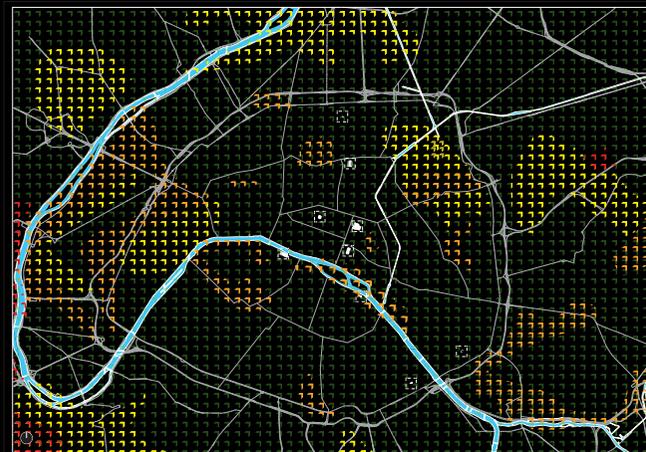


illustration 34 Cartes des gisements énergétiques de type « diffus », TH1 Villien

illustration 35 Superposition des cartes des gisements énergétiques de type « diffus », TH1 Villien >



SOLAIRE



ÉOLIEN

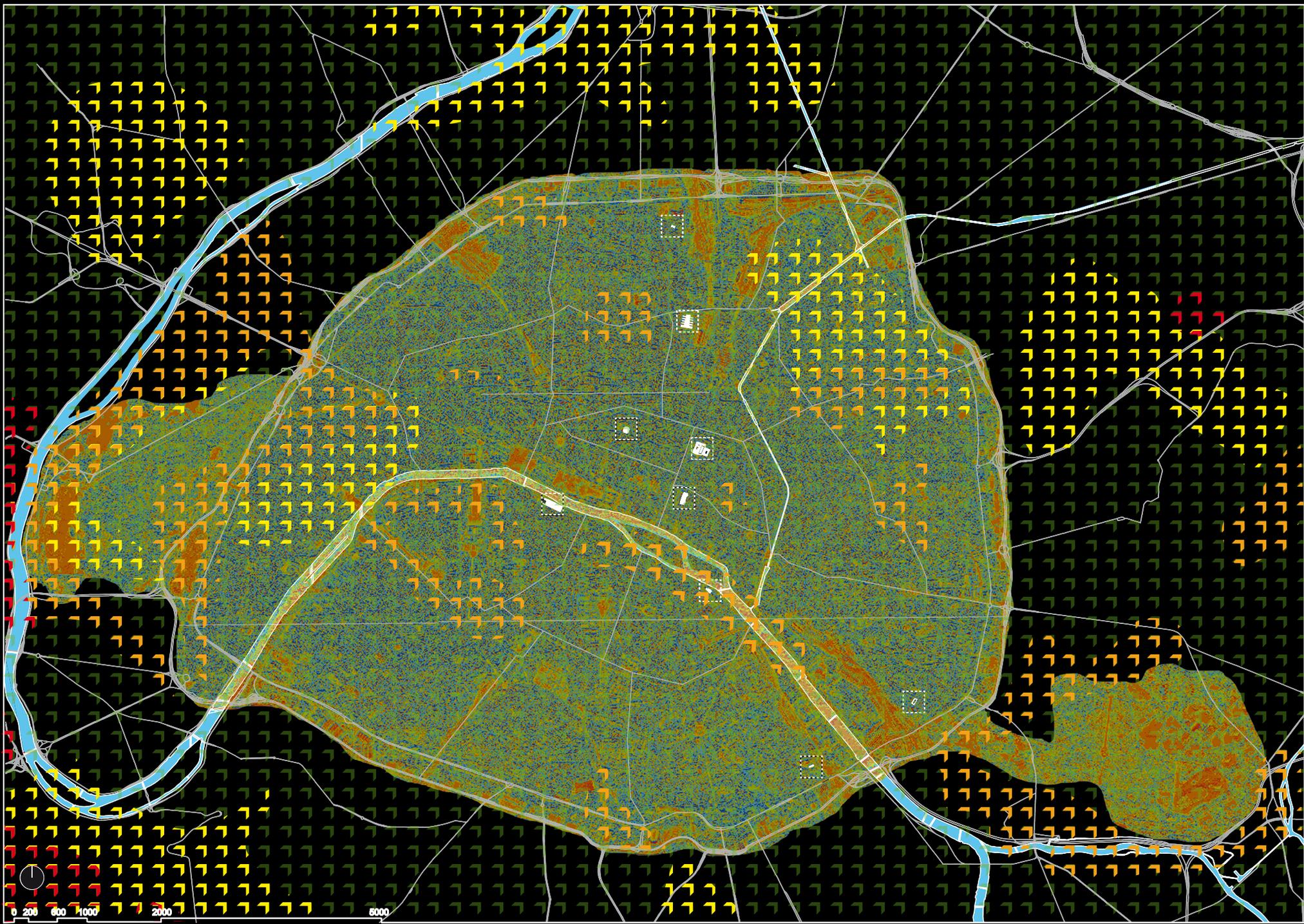


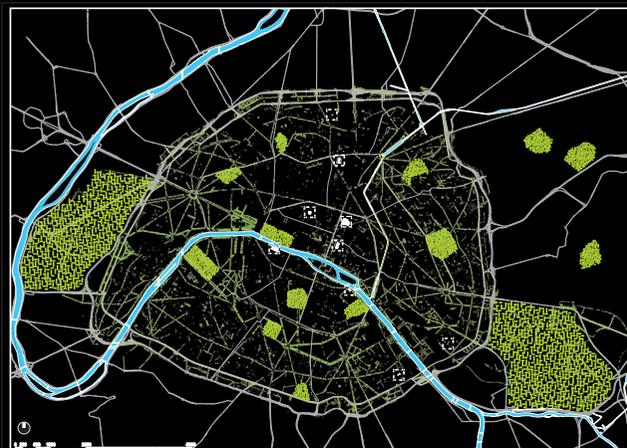
illustration 36 Cartes des gisements énergétiques de type « poches », TH1 Villien

illustration 37 Superposition des cartes des gisements énergétiques de type « poches », TH1 Villien

>



 DATA CENTERS



 BIOMASSE

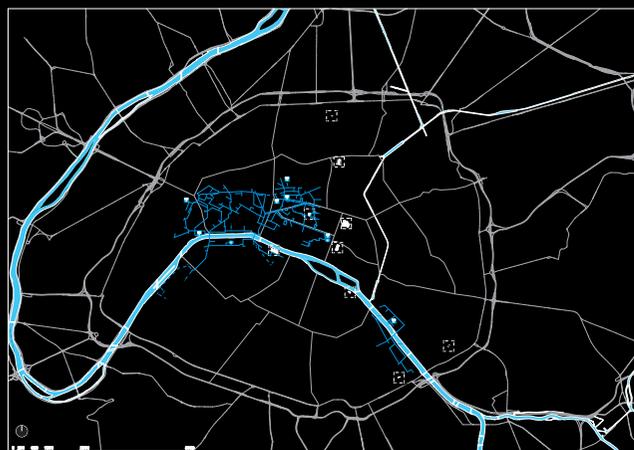


 GÉOTHERMIE



illustration 38 Cartes des gisements énergétiques de type « flux », TH1 Villien

illustration 39 Superposition des cartes des gisements énergétiques de type « flux », TH1 Villien >



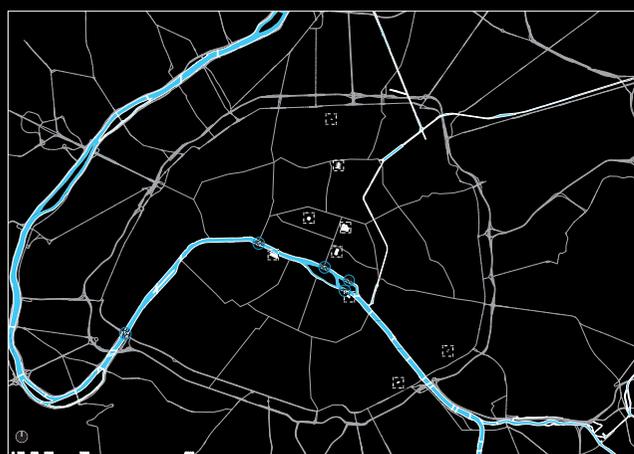
 RÉSEAU DE FROID URBAIN



 RÉSEAU DE CHAUFFAGE URBAIN



 RÉSEAU FERRÉ SOUTERRAIN



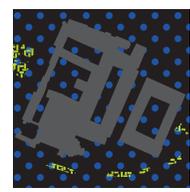
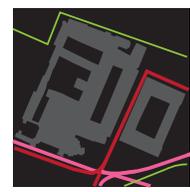
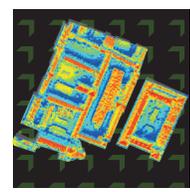
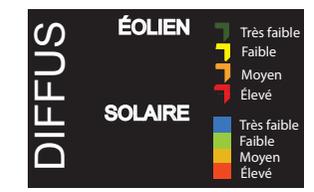
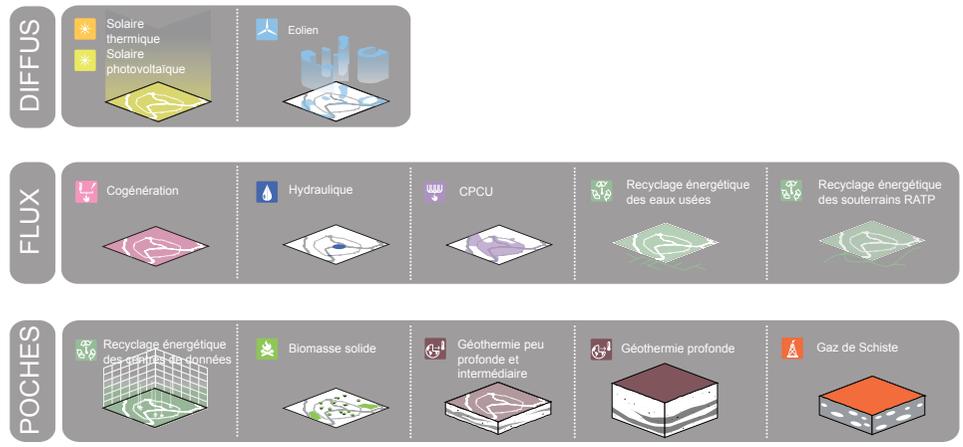
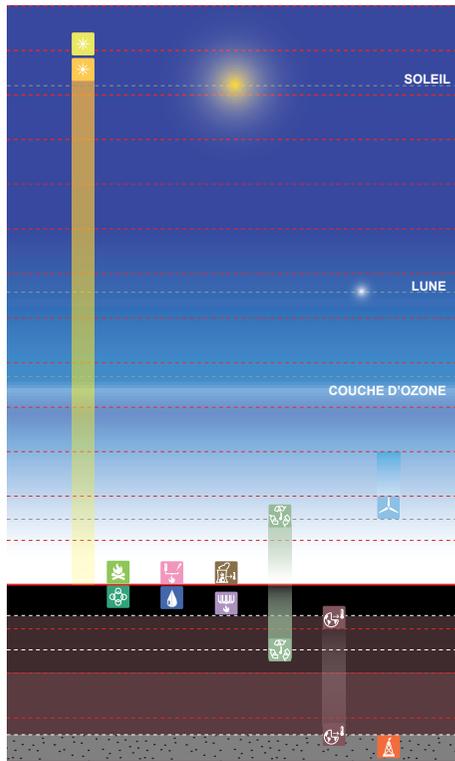
 HYDRAULIQUE



 EAUX USÉES



illustration 40 Transition d'échelle, de la ville (L) à l'îlot (M), de la coupe globale aux TEPOS, TH1 Villien



4. PROSPECTIVE À L'ÉCHELLE M : LES ILOTS TEPOS

Passage de l'échelle parisienne à l'échelle des îlots et des bâtiments :

Les principes prospectifs qui nous permettent de faire le passage d'une échelle à l'autre de manière cohérente confirment deux tendances de notre présent. D'une part nous postulons que l'autoconsommation de l'énergie produite localement va se développer significativement par des usages à venir perceptible en « signaux faibles ». D'autre part la consommation en circuit court est une tendance lourde de notre époque qui devrait également se développer sur les décennies à venir.

Il s'agit de projeter des mix énergétiques nouveaux selon les différents TEPOS à partir de nos 3 types de gisements.

Notre typologie élaborée à l'échelle L grâce à la coupe territoriale est ainsi rendue opérationnelle à

l'échelle M, celle de l'îlot.

A cette échelle du TEPOS il convient d'identifier finement les « gisements » des énergies disponibles selon leurs spatialités spécifiques.

Il faut rappeler que la positivité s'apprécie à partir d'une balance à somme positive entre des besoins en constante diminution et des gisements d'énergies effectivement exploitables au sein d'un territoire donné. Et cette positivité doit être établie dans la coupe elle-même, « de la cave à la canopée » mais cette fois-ci à l'échelle de l'îlot.

Les données dimensionnantes des TEPOS sont nombreuses. Elles peuvent être extrapolées à partir de l'extraordinaire diversité des connaissances cartographiques du territoire parisien.

En superposant les grands types de gisements énergétiques nous discernons différents « mix » possibles.

De Beaubourg à la Bourse, de l'IMA au musée d'Orsay, de l'îlot des Arts et Métiers à l'immeuble de l'Armée du Salut les disponibilités des ressources énergétiques sont étonnamment différenciés.

Nous pouvons ainsi affecter à chaque équipement étudié un « mix » énergétique spécifique », issu de sa localisation, en lien direct avec les ressources énergétiques localement accessibles.

Une pondération selon les mix peut être tentée pour évaluer le potentiel de « positivité » de chaque TEPOS.

Elle est ici analysée par types ce qui favorise le projet à l'échelle L, celle de l'édifice.

illustration 41 Diversité des TEPOS : extractions à l'échelle de l'îlot (M) centrées sur les 9 cas étudiés, des indicateurs densité, épanelage, mémoriel, thermographique, matériaux, TH1 Villien

5.1 Les DPE comme première évaluation de départ pour la prospective.

Les DPE analysés dans la perspective des TEPOS évoluent avec les nouveaux gisements énergétiques.

Le potentiel des TEPOS autour des 9 cas d'étude

Nous considérons que les 9 cas pris ensemble sont chacun significatifs de ce que seront les équipements patrimoniaux dans Paris dans une gestion durable de l'énergie.

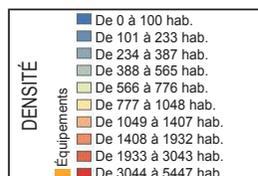
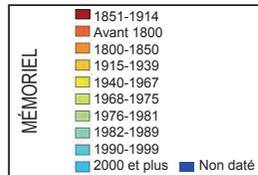
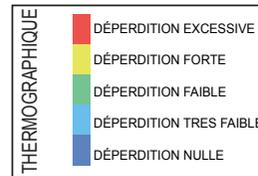
Il nous faut donc lier des territoires spécifiques avec de multiples bâtiments existants et nos édifices remarquables qui ont des édifices collectifs patrimoniaux. Chaque cas de la recherche HPCE devient producteur d'énergie, au-delà de ses besoins. Bien sûr il le fera selon ses dispositions et son identité propre, selon son contexte mémoriel recelant des gisements énergétiques répertoriés. Il nous faudra in fine établir les limites des impacts admissibles par la

nature patrimoniale de nos cas étudiés.

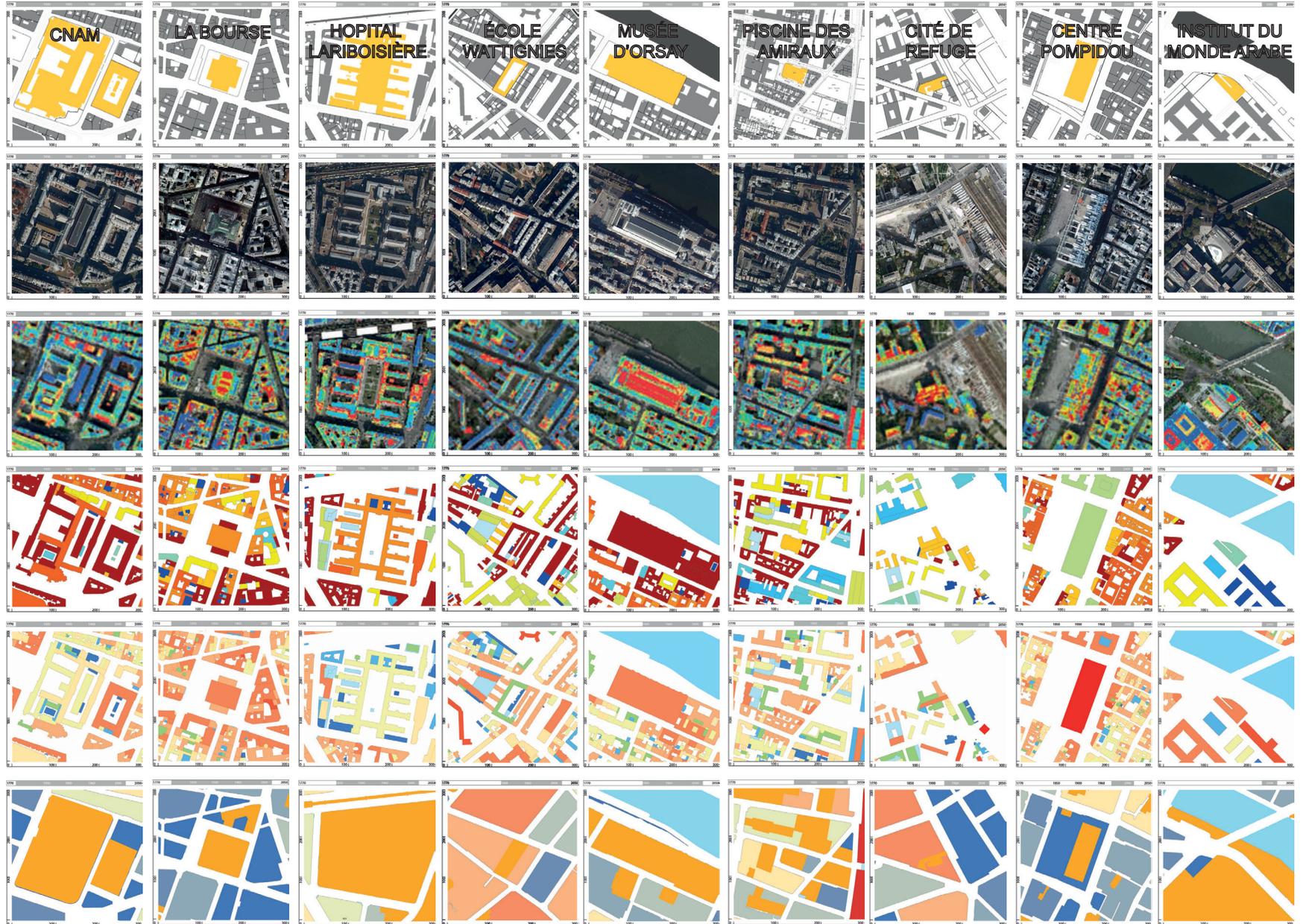
illustration 42 PAGE SUIVANTE > Diversité des TEPOS : extractions à l'échelle de l'îlot (L) centrées sur les 9 cas étudiés, par types de gisement, TH1 Villien

illustration 43 PAGE SUIVANTE >> Diversité des TEPOS : planche synoptique avec les 3 types de gisements et l'évaluation des potentiels d'exploitation pour les 9 cas étudiés, TH1 Villien

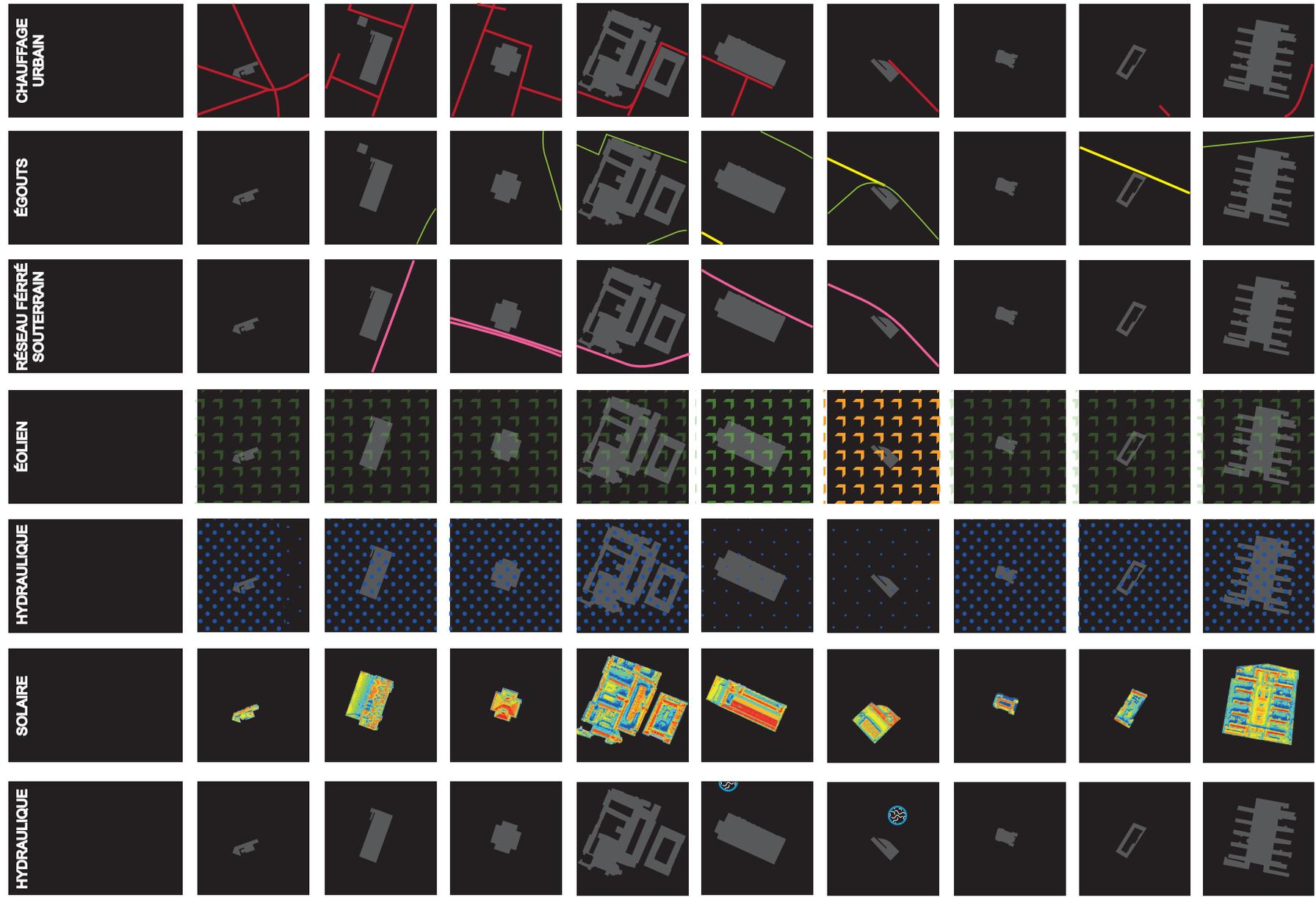
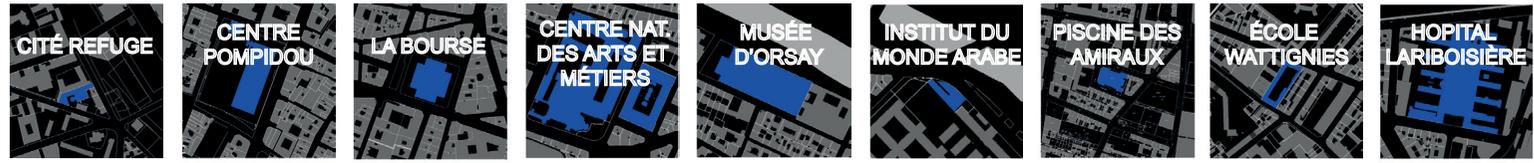
INDICATEURS À L'ÉCHELLE «M»



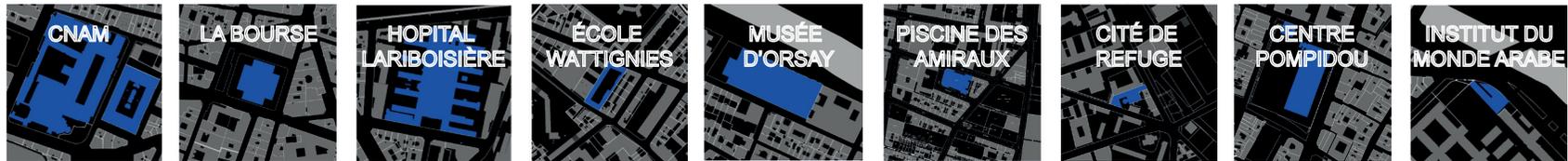
ÉQUIPEMENTS



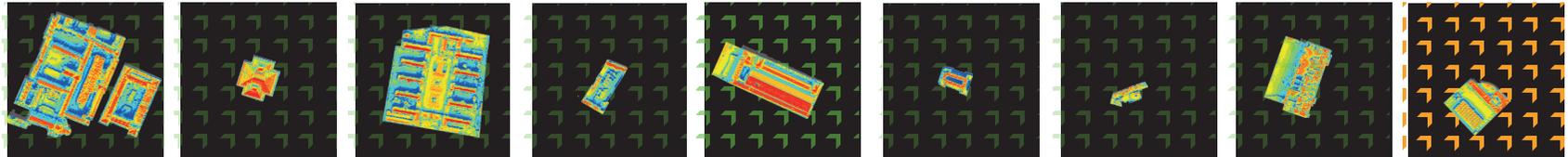
Équipements
Gisements énergétiques
et légendes



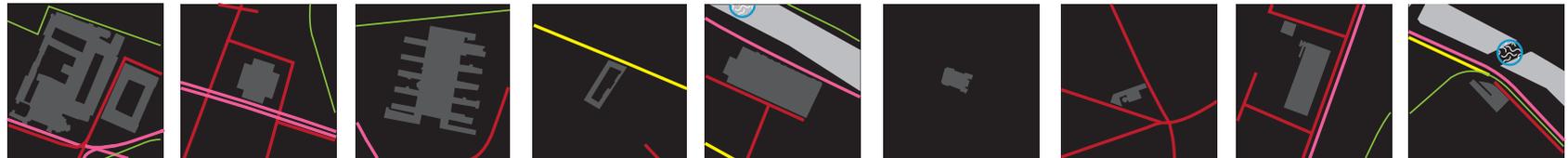
Équipements
Gisements énergétiques



DIFFUS
ÉOLIEN
SOLAIRE



FLUX
CHAUFFAGE URBAIN
ÉGOUTS
RÉSEAU FERRÉ SOUTERRAIN
HYDRAULIQUE



POCHES
GÉOTHERMIE
BIOMASSE SOLIDE



POTENTIEL D'EXPLOITATION

DIFFUS
ÉOLIEN
SOLAIRE
TOTAL DIFFUS

FLUX
CHAUFFAGE URBAIN
ÉGOUTS
RÉSEAU FERRÉ SOUTERRAIN
HYDRAULIQUE
TOTAL FLUX

POCHES
GÉOTHERMIE
BIOMASSE SOLIDE
CULTURE ALGALE ASSOCIATION
PROGRAMMATIQUE
TOTAL POUCHES

2	2	2	2	4	2	2	2	8
8	8	10	6	10	8	6	10	8
10	10	12	8	14	10	8	12	16
10	10	10	8	10	6	10	10	10
8	6	8	10	8	2	6	6	10
8	10	8	0	10	0	0	10	10
0	0	0	0	6	0	0	0	10
28	26	26	18	34	8	16	26	40
8	8	8	8	2	8	8	8	2
6	6	6	6	6	6	6	6	6
2	2	8	2	2	2	2	8	8
10	0	10	0	10	10	10	10	10
26	16	32	16	20	26	26	32	26

POTENTIEL TOTAL	64%	52%	70%	42%	68%	44%	50%	70%	82%
------------------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

LÉGENDE: 0 = Pas de gisement. 2 = Gisement inexploitable 4 = Gisement faible/éloigné dont l'exploitation ne serait pas satisfaisante. 6 = Gisement moyen ou dont l'exploitation nécessite un effort plus important. 8 = Gisement important 10 = Gisement intéressant par sa disponibilité et son intégration à l'équipement 10 = Gisement exploité par l'équipement.

EL: Apport électrique
Ch: Apport en chaleur/fraicheur
Au: Autres

illustration 44 Échelle S : planche synoptique de la répartition des énergies fossiles primaires et renouvelables primaires pour 5 cas étudiés, à partir des DPE (état actuel), TH1 Villien

	Consommation annuelle finale (en kWh.an)	Rapportée à la surface chauffée (kWh/m ² .an)	Vecteurs			Production interne	negawatts évalués	Energies fossiles primaire					Energies renouvelables primaires						% total			
			Pourcentage GAZ	Pourcentage CPCU	Pourcentage réseau EDF																	
INSTITUT DU MONDE ARABE	4 681 662 kWh.an	255 kWh/m ² .an	0	30,65%	69,35%	Non	0	8%	3%	56%	11%		1%	13%		0%	1%			1%	5%	100%
Musée d'Orsay	17 895 930 kWh.an	389 kWh/m ² .an	0	35,40%	64,60%	Non	0	9%	4%	52%	12%		1%	15%		0%	1%			1%	5%	100%
Centre Pompidou	25 168 441 kWh.an	314 kWh/m ² .an	0	26,47%	73,53%	Non	0	8%	3%	59%	9%		1%	11%		0%	1%			1%	6%	100%
Cité de refuge	2 840 560 kWh.an	198 kWh/m ² .an	0	76,93%	23,07%	Non	0	16%	6%	19%	23%		0%	33%		0%	0%			0%	2%	100%
GROUPE SCOLAIRE WATTIGNIES	293 909 kWh.an	122 kWh/m ² .an	37,19%	0	62,81%	Non		2%	1%	50%	39%		1%	0%		0%	1%			1%	5%	100%

Par énergie	Moy. Fossiles					Moy. Renouvelables						100%										
Par énergie			9%	3%	47%	19%			1%	15%		0%	1%				1%	5%				
TOTAL	78%					22%																

CPCU	20,00%	8,0%		29,00%			43,00%							
Réseau électrique	3,1%	1,2%	80,40%	2,4%		1,2%			0,3%	1,5%			1,9%	7,8%

5. PROSPECTIVE À L'ÉCHELLE S - LES ÉDIFICES BEPOS

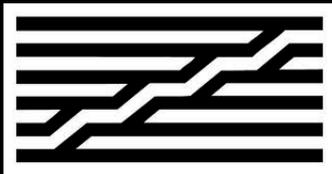
Prenons enfin trois cas, parmi les 9 étudiés à l'échelle de l'îlot, pour évoquer les conséquences de l'approche TEPOS à l'échelle S, celle du bâtiment.

Nous figurerons dans l'ordre la situation de l'équipement vis-à-vis des gisements énergétiques de son contexte. Puis nous récapitulons une balance des énergies « globales » et des « locales », pour préciser la positivité du bâtiment.

Les détails des calculs de la simulation sont livrés tels quels, afin de conserver accessibles les conditions actuelles de cette prospective. En effet les calculs sont basés en général sur les ratios connus à ce jour pour chaque énergie. Pour certaines énergies ces ratios sont peu établis et ils seront certainement revus notablement lors du développement industriel des applications. Mais les ordres de grandeur obtenus sont spécifiques et surtout significatifs de chaque cas étudié. Les risques d'erreurs

sont avérés en prospective mais l'amplitude de celles-ci est difficile à déterminer. Nous tenons donc à livrer ce travail de dimensionnement dans ses détails pour contribuer à l'avancée des simulations énergétiques.

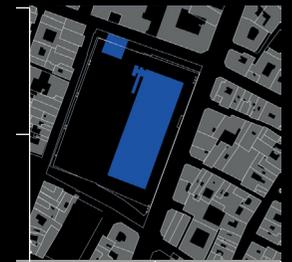
Enfin des simulations visuelles sont proposées par des montages photographiques. Elles montrent des états avant et après transformations. L'objectif de ces vues est de figurer les implications de la transition énergétique poussée dans certaines extrémités. Ces édifices emblématiques sont selon nous respectés et accompagnés vers des évolutions nécessaires. Nous avons conçu des dispositifs spatiaux en résonance avec l'histoire et les qualités énergétiques premières de ces bâtiments. Nous pensons qu'il faut réhabiliter ces édifices en rapport avec leur trajectoire énergétique singulière.



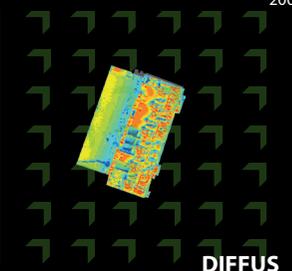
Situation de l'équipement et gisements énergétiques locaux

CENTRE GEORGES POMPIDOU

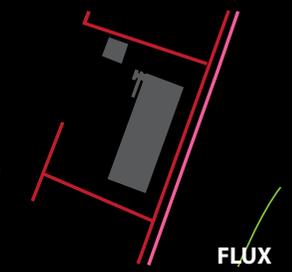
illustration 45 Situation du Centre Georges Pompidou vis-à-vis de ses gisements locaux par types, TH1 Villien



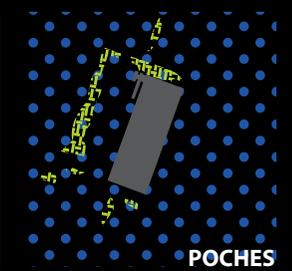
200m



DIFFUS



FLUX



POCHES

5.1 Prospective sur le Centre Georges Pompidou

Le Centre Georges Pompidou est emblématique à plus d'un titre mais il l'est assurément du point de vue de l'énergie. Il est comme le décrit Renher Banham l'un des premiers édifices de renommée mondiale à exhiber sa maîtrise de l'environnement dans son enveloppe même.

Notre prospective amplifie cette thèse et la prolonge. Et si « Beaubourg » redevenait un emblème du changement radical de l'expression de l'énergie en ville?

Les gisements énergétiques sont particulièrement abondants comme le montre l'évaluation faite précédemment pour chaque îlot (*illustration 45*).

Le Centre Georges Pompidou est cerné par des égouts, il est placé sur un champ de géothermie favorable et peut affecter une partie importante de ses toitures au recueil de l'énergie solaire. Le potentiel

de récupération d'énergie issue des souterrains du métro situé dans sa proximité immédiate est considérable. La possibilité d'une association productive positive avec d'autres programmes mérite d'être développée et étudiée en détail, nous l'avons développé avec un data center. Enfin son haut volume permet l'implantation d'éoliennes urbaines, potentiel non exploité dans la simulation.

Pour améliorer encore la positivité de cet équipement patrimonial exceptionnel une production de biogaz algal pourrait réécrire partiellement sa façade Sud. Nous avons valorisé le magnifique parvis en pente douce avec une implantation ponctuel de géothermie, ceci étant favorable vu l'emprise de chantier nécessaire pour forer ces puits. Les émergences sont traitées sous la forme de totems énergétiques évoquant des cheminées et constituant autant de supports de la signalétique des expositions majeures.

Ces gisements conjugués désignent cet équipement comme un lieu majeur de production énergétique

couvrant largement ses besoins propres, bien entendu en grande diminution par rapport à ses origines, et fournissant un excédent très important pour le quartier, le TEPOS auquel il appartiendra.

illustration 46 Centre Georges Pompidou : les coupes énergétiques et les répartitions des consommations par énergies à l'échelle du bâtiment (S) à 3 moments de son histoire : 1977, 2013 et 2050, TH1 Villien

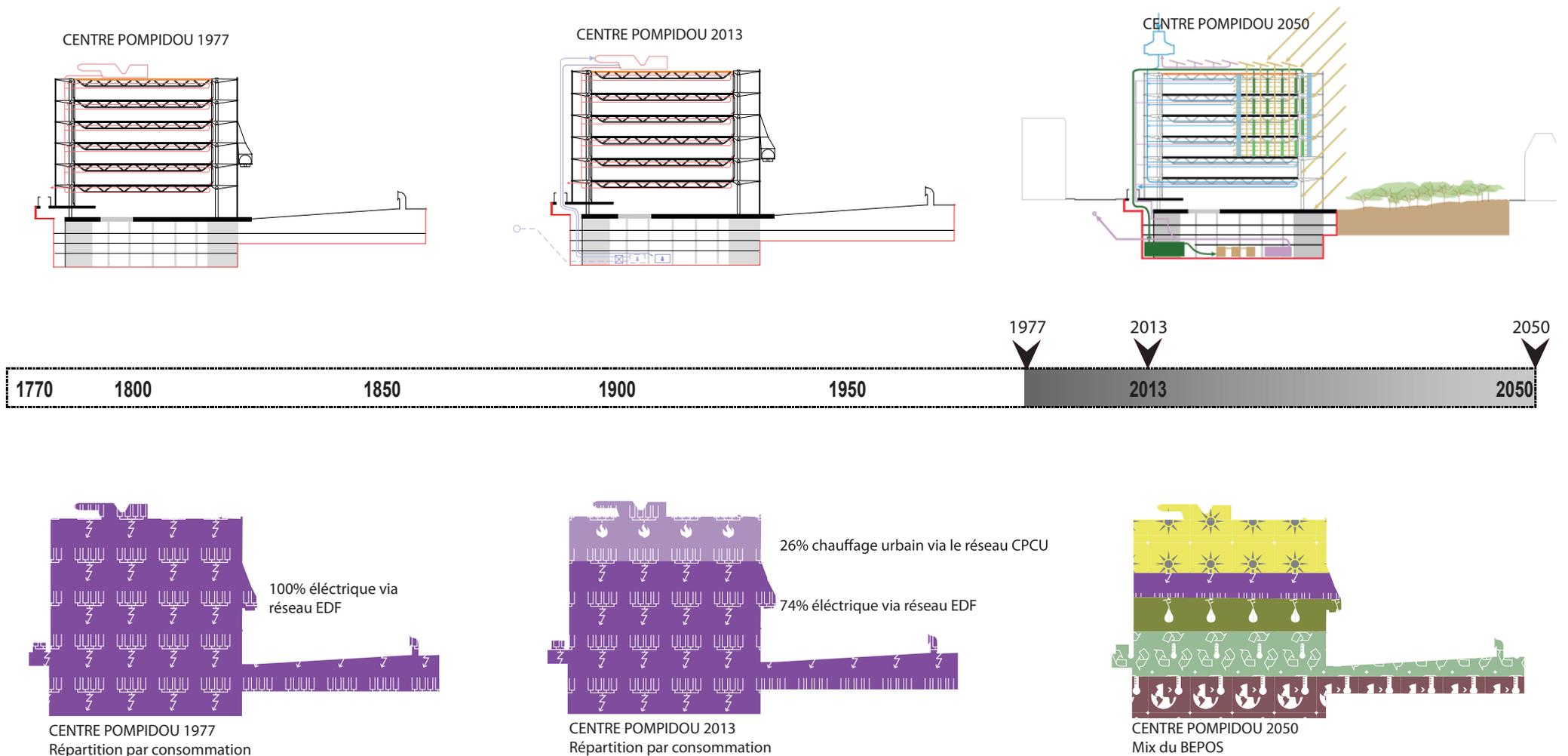


illustration 47 Centre Georges Pompidou : coupe énergétique prospective, état 2050, TH1 Villien

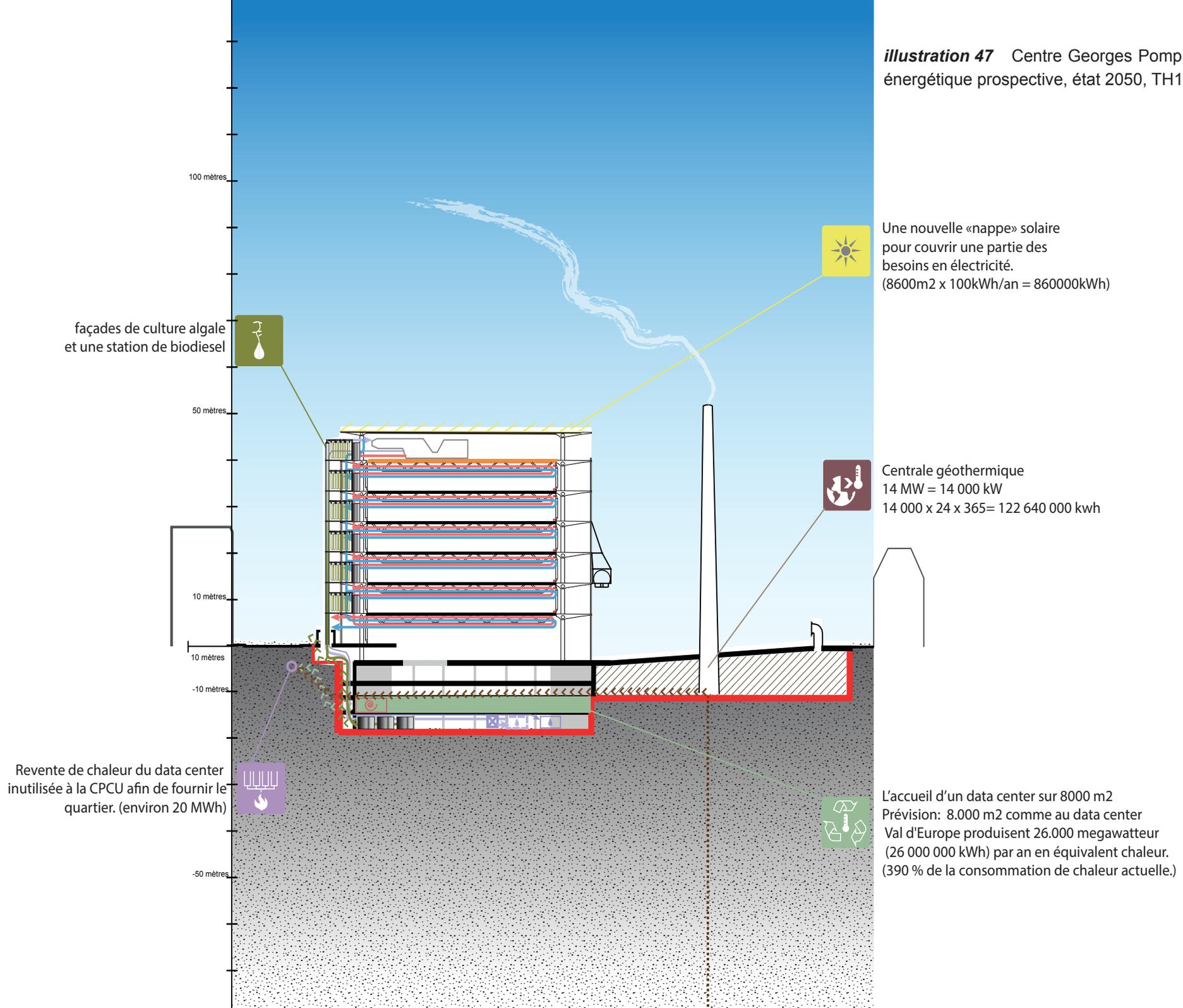


illustration 48 Façade rue du Renard du Centre Georges Pompidou : référence imaginaire aux usines à gaz de coke du XIXème siècle²

2 vue extraite de l'atlas photographique de la Compagnie Parisienne d'Éclairage et de Chauffage par le Gaz – 1878 – Archives de la Ville de Paris

Détails de la simulation

L'aspect architectural du bâtiment, dévoilant ses infrastructures techniques en façade et toiture, facilite le travail d'intégration et permet un redéploiement des concepts environnementaux originaux. Sa localisation au centre de Paris assure une excellente disponibilité des gisements liés aux réseaux.

Consommation actuelle

CPCU : 6 662 042 kWh (26,47%)

Électricité : 18 506 398,5 kWh (73,53%)

Travaux de rénovation énergétique en cours (jusqu'en 2015), objectif économie 20% au total concentrés sur les équipements de consommation électrique (climatisation, PAC, etc.) Ce qui ramènera dès 2016 la consommation à environ 13 825 390 kWh par an en électricité.

Les énergies de la transition

Chauffage urbain :

Le Centre Pompidou est entouré par le réseau de chauffage urbain auquel il est relié depuis les derniers grands travaux de rénovation (1997-2000).

Consommation actuelle 6 662 042 kWh

Biomasse liquide :

L'équipement se prête bien à la culture de micro algues étant donné la configuration et la hauteur de ses façades. Les photobioréacteurs fonctionnent par photosynthèse et nécessitent pour cela un apport solaire direct. Une attention particulière devra donc être portée aux effets de masque créés par les bâtiments environnants. L'implantation en façade de systèmes de production de biomasse alguale répartis en tubes de diamètre 0,1 m. (soit 565 tubes sur les 2 façades les plus exposées) permettrait au Centre Georges Pompidou de devenir un producteur

important de biofuel. Un tube sur la hauteur totale du centre représente 1,32 m³. $565 \times 1,32 = 744,48 \text{ m}^3$. Un mètre cube de biomasse alguale peut produire 2 873 litres de biodiesel par an. Un litre de biodiesel correspond environ à 9 kWh => $2 873 \times 744 = 2 138 891 \text{ litres/an}$. Un litre de biofuel correspond environ à 9 kWh. $2 138 891 \times 9 = 19 250 019 \text{ kWh/an}$.

Solaire Photovoltaïque :

Le cas du Centre Georges Pompidou en matière de « solaire » est singulier. La hauteur du bâtiment par rapport à son contexte en ferait un gisement solaire de premier choix si sa toiture plane n'était pas partiellement occupée par diverses fonctions techniques créant des masques d'ombre. La toiture fait plus de 8 000 mètres carrés, ce qui pourrait constituer une source importante d'énergie dans la facture énergétique globale de l'équipement, actuellement élevée. Une nouvelle structure pourrait voir le jour dans le but de capter un maximum du gisement solaire en toiture. Cette « nappe énergétique » appor-



tée au bâtiment pourrait être soit surélevée, soit suivre les caractéristiques de la toiture, s'appuyant sur les gaines techniques. Ces 2 systèmes auraient bien entendu des rendements différents.

Rendement : en moyenne 1 m² de capteurs = 100 Wc soit 100 kWh par an (pour un ensoleillement moyen de 1 000 kWh/kWc). 8 600m² de panneaux solaire pourraient donc produire : 8 600 x 100= 860 000 kWh/an.

Recyclage énergétique interne via un « data center » :

L'accueil au sein du bâtiment d'un data center dans les sous-sols débarrassés des stationnements actuels, couvrirait largement les besoins en chauffage. Rendement : les data centers sont de gros consommateurs d'électricité. Pour 8 000m² il faut compter (1,5 kW/m² x 8 000 m² x 8 760 h/an) pas moins de 105 000 000 kWh/an. Cependant, la chaleur produite par les appareils électriques du data center pourra à la fois couvrir les besoins du centre mais

aussi ceux du quartier via le réseau CPCU à hauteur de 26 mWh/an.

Géothermie :

Une centrale géothermique raccordée au CPCU prend place sous le parvis de Beaubourg, le traversant pour laisser échapper de hautes cheminées pour des ventilations à tirage thermique et pour l'évacuation de quelques volutes de vapeur d'eau éventuelles. Ces infrastructures techniques sont mises en évidence par le Centre comme celles de sa façade de la rue du Renard et celles de sa toiture. La puissance de la centrale géothermique pourrait être estimée à 14 mW, soit environ 122 640 000 kWh/an. (14 000 x 24 x 365). Ceci est une estimation ambitieuse.

Conclusion :

Louer de l'espace contre de l'énergie peut être une solution d'avenir pour le Centre Georges Pompidou. En accueillant un data center, le Centre consommerait globalement plus d'énergie, cependant, cette énergie consommée par le data center produit de la chaleur qui est généralement perdue et pourrait être restitué au Centre.

L'hypothèse de la géothermie est très importante pour garantir une positivité exemplaire.

illustration 49 Centre Georges Pompidou :
balance des productions globales et locales à 3
stades : 2014, 2020 et 2050, TH1 Villien

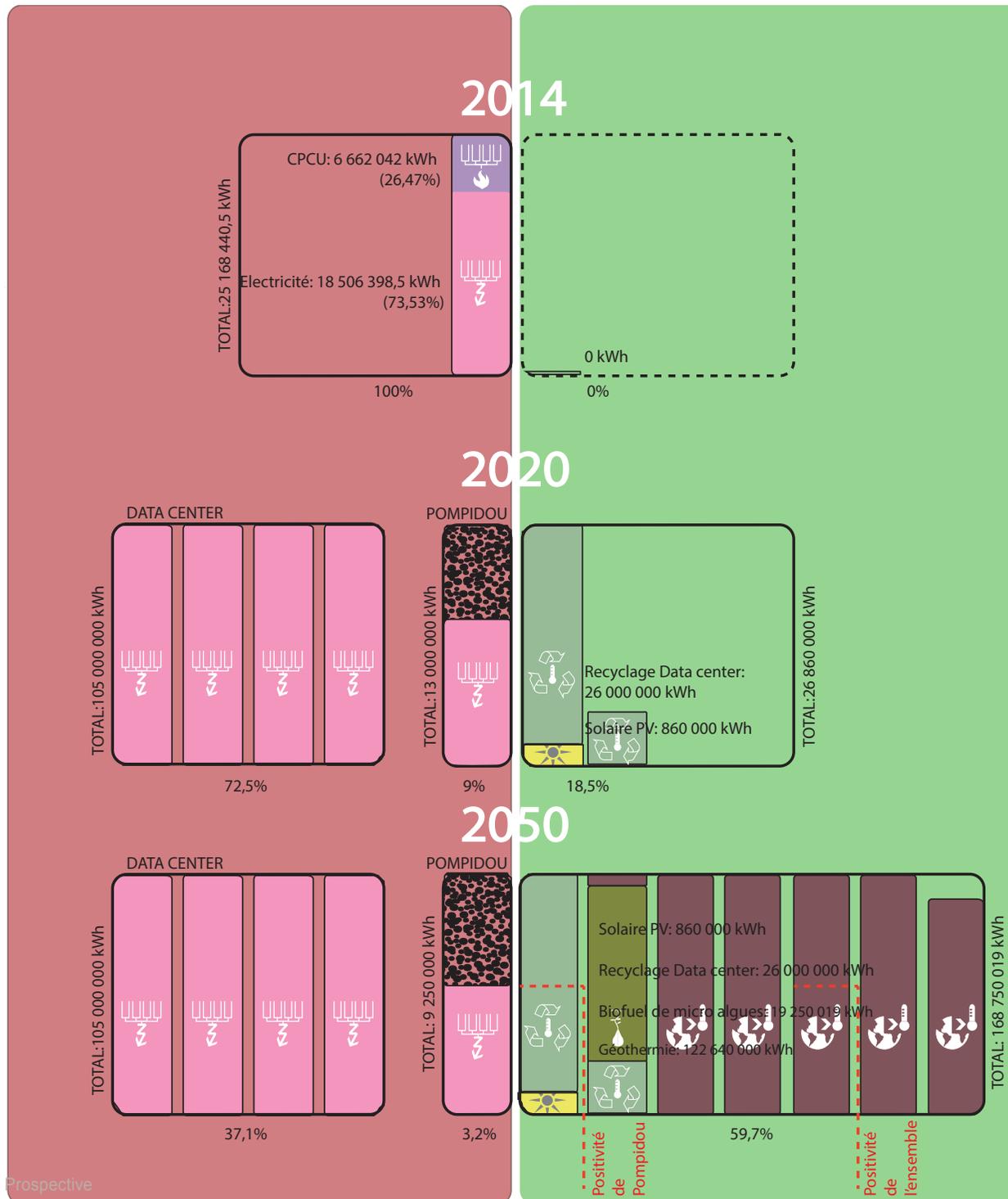


illustration 50 Centre Georges Pompidou : calcul des productions d'énergies locales de 2013 à 2050, TH1 Villien

L'aspect architectural du bâtiment, dévoilant ses infrastructures techniques en façade et toiture, facilite le travail d'intégration et permet un redéploiement des concepts environnementaux originaux. Sa localisation au centre de Paris assure une excellente disponibilité des gisements liés aux réseaux.

CONSOMMATION ACTUELLE :

 **CPCU: 6 662 042 kWh** (26,47%)

 **Electricité: 18 506 398,5 kWh** (73,53%)

Travaux de rénovation énergétique en cours (jusqu'en 2015), objectif économie 20% au total concentrés sur les équipements de consommation électrique (climatisation, PAC, etc.) Ce qui ramènera dès 2016 la consommation à environ 13 825 390 kWh par an en électricité.

LES ACTEURS DE LA TRANSITION



Chauffage urbain :

Le Centre Pompidou est entouré par le réseau de chauffage urbain auquel il est relié depuis les derniers grands travaux de rénovation (1997-2000).

Consommation actuelle 6 662 042 kWh



Biomasse liquide :

L'équipement se prête bien à la culture de micro algues étant donné la configuration et la hauteur de ses façades. Les photobioréacteurs fonctionnent par photosynthèse et nécessitent pour cela un apport solaire direct. Une attention particulière devra donc être portée aux effets de masque créés par les bâtiments environnants. L'implantation en façade de systèmes de production de biomasse algale répartis en tubes de diamètre 0,1 m. (soit 565 tubes sur les 2 façades les plus exposées) permettrait au Centre Georges Pompidou de devenir un producteur important de biofuel. Un tube sur la hauteur totale du centre représente 1,32 m³. 565 x 1,32 = 744,48 m³. Un mètre cube de biomasse algale peut produire 2 873 litres de biodiesel par an. Un litre de biodiesel correspond environ à 9 kWh => 2 873 x 744 = 2 138 891 litres/an. Un litre de biofuel correspond environ à 9 kWh.

2 138 891 x 9 = 19 250 019 kWh/an.



Solaire Photovoltaïque :

Le cas du Centre Georges Pompidou en matière de « solaire » est singulier. La hauteur du bâtiment par rapport à son contexte en ferait un gisement solaire de premier choix si sa toiture plane n'était pas partiellement occupée par diverses fonctions techniques créant des masques d'ombre. La toiture fait plus de 8 000 mètres carrés, ce qui pourrait constituer une source importante d'énergie dans la facture énergétique globale de l'équipement, actuellement élevée. Une nouvelle structure pourrait voir le jour dans le but de capter un maximum du gisement solaire en toiture. Cette « nappe énergétique » apportée au bâtiment pourrait être soit surélevée, soit suivre les caractéristiques de la toiture, s'appuyant sur les gaines techniques. Ces 2 systèmes auraient bien entendu des

rendements différents.

Rendement : en moyenne 1 m² de capteurs = 100 Wc soit 100 kWh par an (pour un ensoleillement moyen de 1 000 kWh/kWc).

8 600m² de panneaux solaire pourraient donc produire : 8 600 x 100 = 860 000 kWh/an.



Recyclage énergétique interne via un « data center » :

L'accueil au sein du bâtiment d'un data center dans les sous-sols débarrassés des stationnements actuels, couvrirait largement les besoins en chauffage.

Rendement : les data centers sont de gros consommateurs d'électricité. Pour 8 000m² il faut compter (1,5 kW/m² x 8 000 m² x 8 760 h/an) pas moins de 105 000 000 kWh/an. Cependant, la chaleur produite par les appareils électriques du data center pourra à la fois couvrir les besoins du centre mais aussi ceux du quartier via le réseau CPCU à hauteur de 26 mWh/an.



Géothermie :

Une centrale géothermique raccordée au CPCU prend place sous le parvis de Beaubourg, le transperçant pour laisser échapper de hautes cheminées pour des ventilations à tirage thermique et pour l'évacuation de quelques volutes de vapeur d'eau éventuelles. Ces infrastructures techniques sont mises en évidence par le Centre comme celles de sa façade de la rue du Renard et celles de sa toiture. La puissance de la centrale géothermique pourrait être estimée à 14 mW, soit environ 122 640 000 kWh/an. (14 000 x 24 x 365). Ceci est une estimation ambitieuse.

CONCLUSION :

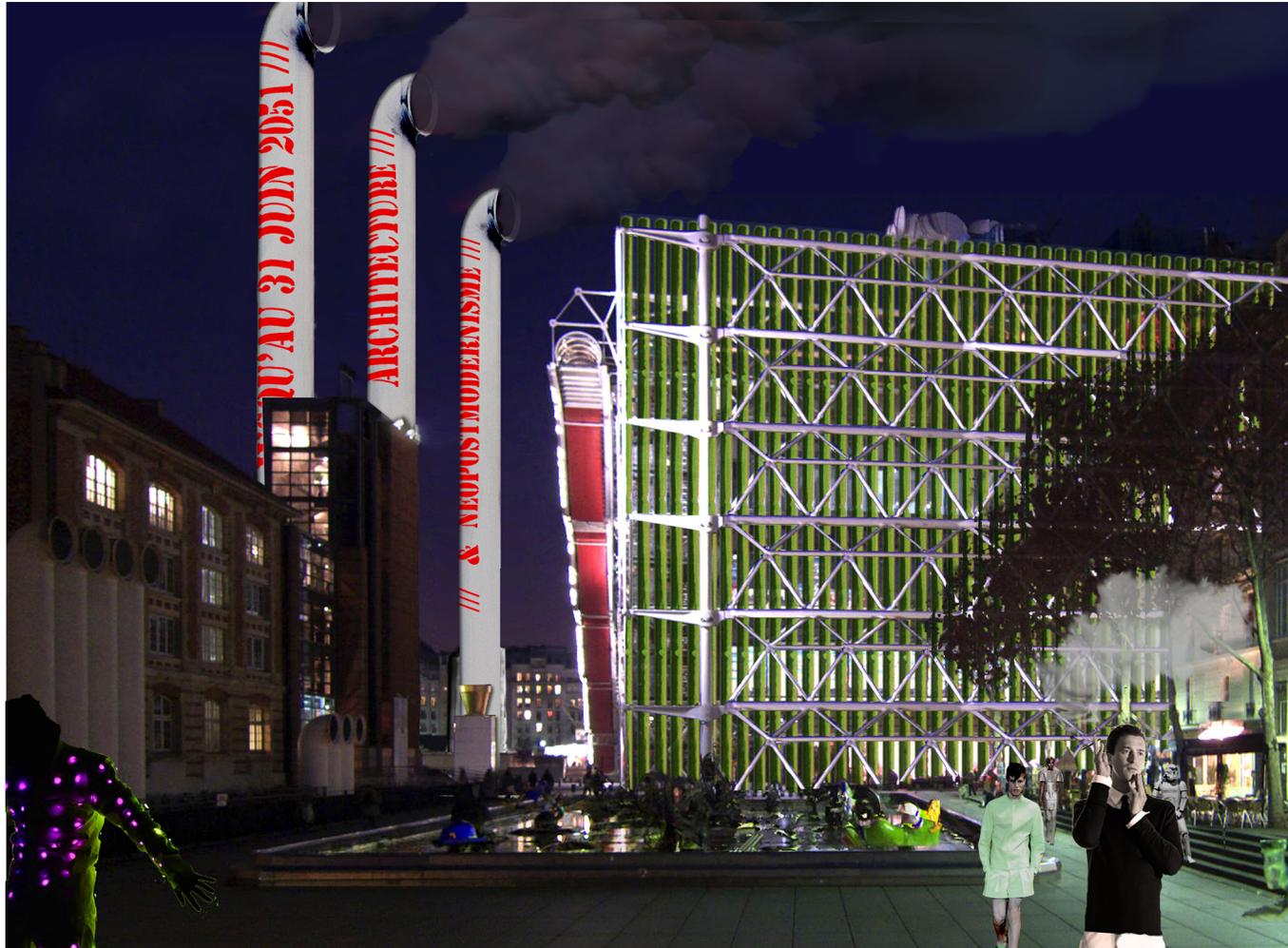
Louer de l'espace contre de l'énergie peut être une solution d'avenir pour le Centre Georges Pompidou. En accueillant un data center, le Centre consommerait globalement plus d'énergie, cependant, cette énergie consommée par le data center produit de la chaleur qui est généralement perdue et pourrait être restituée au Centre.

L'hypothèse de la géothermie est très importante pour garantir une positivité exemplaire.

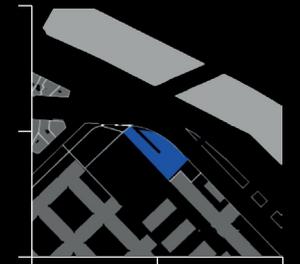
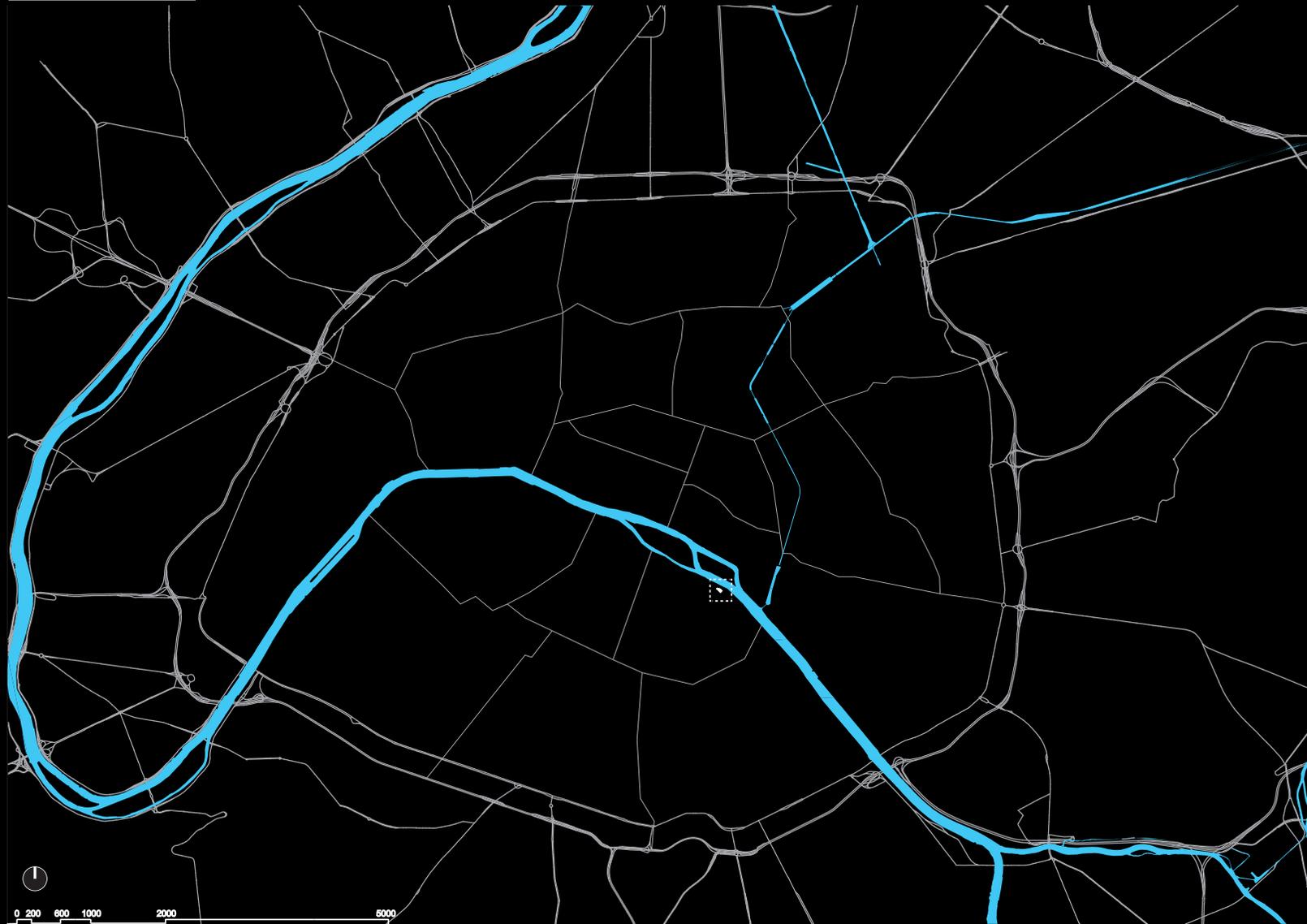
illustration 51 Centre Georges Pompidou : état
actuel en 2013, TH1 Villien



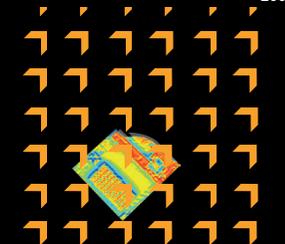
illustration 52 Centre Georges Pompidou : en 2050, simulation avec les productions d'énergies locales, TH1 Villien



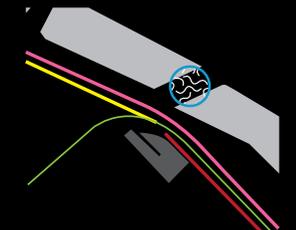
Situation de l'équipement et gisements énergétiques locaux



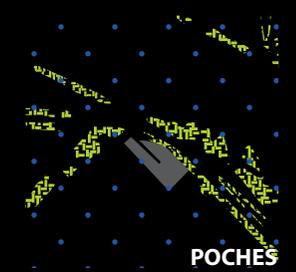
200m



DIFFUS



FLUX



POCHES

illustration 53 Situation de l'IMA vis-à-vis de ses gisements locaux par types, TH1 Villien

5.2 Prospective sur l'Institut du Monde Arabe

L'Institut du Monde Arabe fait partie de cette série d'édifices du dernier quart du XXème siècle qui démontrent une modernité en bord de Seine, avec la BnF - Bibliothèque François Mitterrand, le Musée du Quai Branly. Ces édifices bénéficient des gisements de type flux : le réseau RER, les émissaires d'égouts longent la Seine. La Seine favorise un couloir éolien.

Nous avons exploité la magnifique puissance évocatrice du site pour penser la transition énergétique avec cet équipement. Il est très visible dans les perspectives historiques, depuis les îles centrales, ce qui rend la tâche d'autant plus sensible. Les nouvelles installations sont tout d'abord très peu visibles : la récupération de la chaleur fatale sur les égouts des quais, le raccordement sur une hydrolienne placée dans la Seine.

Les capteurs solaires photovoltaïques nappent le toit terrasse sans grand impact visuel depuis les boulevards.

La façade Sud si précieuse est rénovée à l'identique avec le fonctionnement des multiples diaphragmes photographiques. Ils continuent d'assurer le succès de ce bâtiment, par ce motif hybride entre célébration de la technologie et hommage à une géométrie évoquant le programme multinational lui-même. Ces façades sont considérées comme une marque évidente de l'attention à l'environnement par la régulation fine de la lumière naturelle et le contrôle thermique des apports solaires engendrés par le mur rideau entièrement vitré. La régulation s'opère actuellement toutes les heures : elle serait refaite comme dans la pensée initiale pour fonctionner en temps réel.

La cour ouverte située entre l'édifice et Jussieu, est transformée. Elle dissimule en les enterrant une partie importante du programme. Elle accueille déjà une construction « éphémère » emblématique. Le

Mobil Art, pavillon de Chanel conçu par Zaha Hadid est installé là, après avoir été installé à Hong Kong, à Tokyo et à New York.

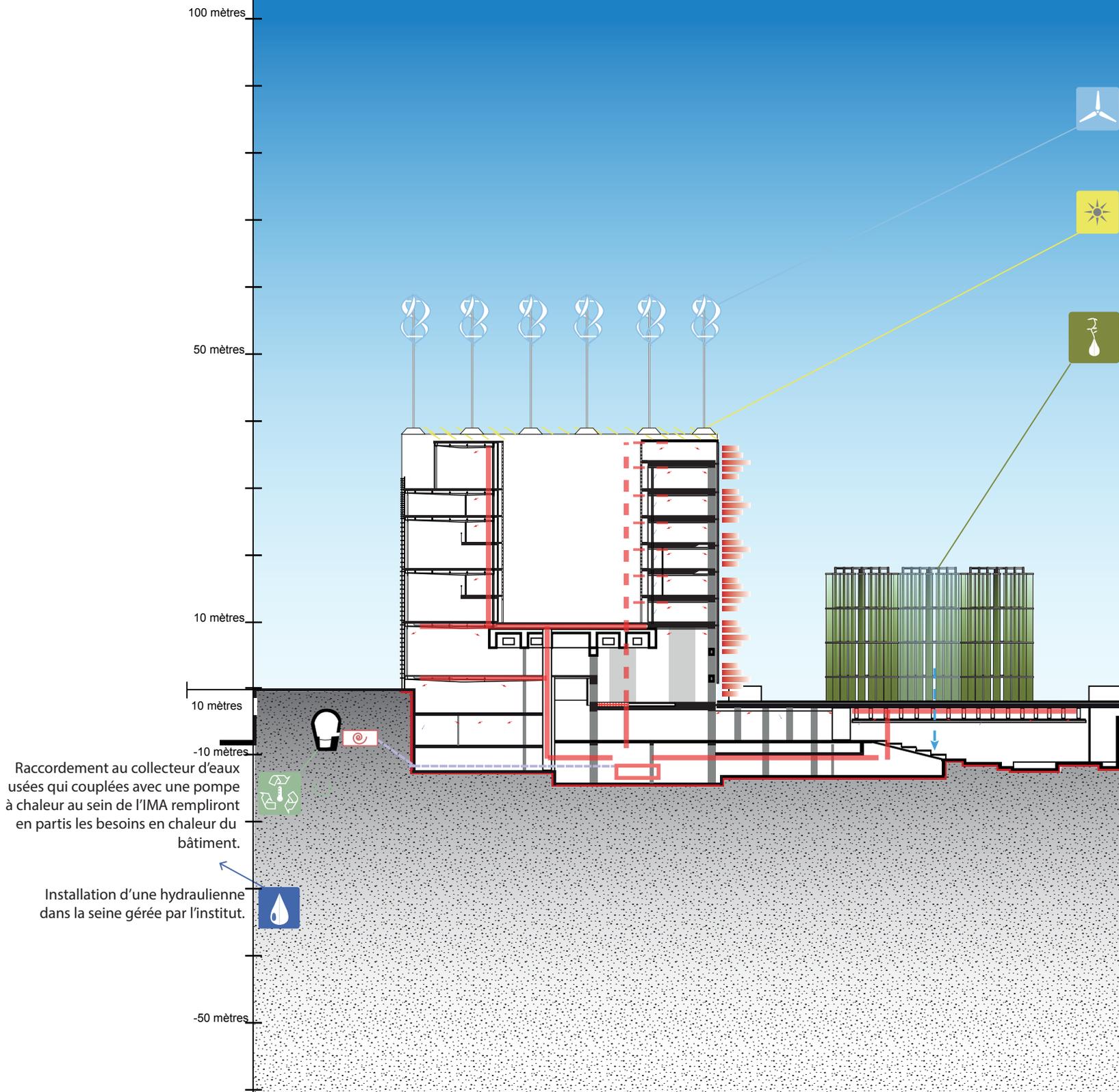
Il n'est donc pas déplacé de concevoir là sur ce parvis, en combinaison avec le sous-sol, une construction productive d'énergie renouvelable importante. Les photobioréacteurs de la culture algale trouveraient là un lieu mettant en valeur de jour comme de nuit leur étrange couleur vert tendre. Les projets pionniers de l'agence X-TU en France nous ont accoutumés dès 2007 à l'expression de cette production d'énergie sur les façades. La puissance installée serait telle que la positivité du bâtiment deviendrait évidente et manifeste.

Enfin depuis la Seine l'image de cet édifice en proue serait complétée par l'installation d'éoliennes. Placées à bonne altitude afin d'éviter les turbulences probables des bâtiments du campus de Jussieu elles deviennent des signes très lisibles. Leur forme est volontairement très abstraite et évocatrices de sculptures contemporaines afin de si-

gnaler là un programme culturel développant des expositions majeures dans Paris. Ces formes mobiles entre en résonance avec les magnifiques bateaux « futuristes » de la Seine, avec leurs coques effilées et leurs superstructures aux écailles vitrées.

La simulation des énergies renouvelables produites localement à l'Institut du Monde Arabe dégage une impression générale de « luxe, de calme et de volupté »³².

32 “Les soleils couchants / Revêtent les champs, / Les canaux, la ville entière, / D’hyacinthe et d’or ; / Le monde s’endort / Dans une chaude lumière. / Là, tout n’est qu’ordre et beauté, / Luxe, calme et volupté. » Charles Baudelaire, poème « invitation au voyage » publié en 1857.



Installation de 6 éoliennes de type Darrieus d'une puissance estimée de 7kW

Couverture de la toiture avec des panneaux solaire pour couvrir une partie des besoins en électricité.

Culture algale sur le parvis puis transformation et vente de biodiesel.

Raccordement au collecteur d'eaux usées qui couplées avec une pompe à chaleur au sein de l'IMA rempliront en partis les besoins en chaleur du bâtiment.

Installation d'une hydraulienne dans la seine gérée par l'institut.

Légende :

- Chaudière
- Gaine de fluide chaud
- Arrivée de fluide
- Retour de fluide
- ➔ Prise d'air
- Gaine d'air froid
- Conduit d'extraction de fumé
- + Eléments de diffusion de chaleur
- Echangeur
- Toiture
- Contact avec le sol
- Réseau de chaleur urbain
- Station de pompage

Détails de la simulation

Le bâtiment est connu pour son innovation technique, bien que son fonctionnement soit encore controversé. La petite tour urbaine d'angle et le patio intérieur sont des atouts morphologiques pour l'intégration de technologies de captage de gisements énergétiques.

Consommation actuelle :

CPCU : 1 435 000 kWh (30,65%)

Électricité : 3 246 662 kWh (69,35%)

Nous faisons l'hypothèse d'une première vague de travaux d'économie d'énergie dans les prochaines années (remplacement des systèmes anciens par de plus récents plus économes) puis d'une seconde entre 2020 et 2050 portant le bâtiment à 50% de sa consommation actuelle (hors évolution prospective de notre part).

Les énergies de la transition

Chauffage urbain :

L'Institut du Monde Arabe est entouré de réseaux urbains qui peuvent constituer une source d'énergie. Il est notamment actuellement relié au réseau de chauffage urbain.

Consommation annuelle moyenne : 1 435 000 kWh.

Solaire Photovoltaïque :

L'Institut du Monde Arabe dispose d'une toiture terrasse d'environ 1000 m². Rendement : en moyenne 1 m² de capteurs = 100 Wc soit 100 kWh par an (pour un ensoleillement moyen de 1 000 kWh/kWc). 1 000 m² de panneaux solaires pourraient donc produire : 1 000 x 100 = 100 000 kWh/an.

Raccordement aux eaux usées :

Un échangeur placé dans le collecteur Saint Bernard (sous le quai Saint Bernard) est envisageable. Il s'agit d'un collecteur primaire dont la cuvette présente une largeur de 100 cm pour une hau-

teur de 100 cm également. Ce système permet à l'école des Wattignies (12e arrondissement) une économie évaluée à plus de 50% d'énergie de chauffage.

Éolien :

Installation de 6 éoliennes de type Darrieus à axe vertical, plus performantes et subissantes moins de contraintes liées au milieu urbain, elles ont aussi l'avantage de capter le vent à 360°. Ces éoliennes ont une puissance de 7 kW. Il faut compter environ 30% d'utilisation optimale pour obtenir leur rendement (soit 30% de 8 760 heures = 2 600 h) : ainsi $7 \times 2\,600 \times 6 = 109\,200$ kWh/an

Hydrolienne :

L'installation de 2 hydroliennes d'une puissance de 4kW aux endroits prescrits par la Mairie de Paris lors de son appel à projet aurait pour rendement : $(4 \times 8760) \times 2 = 70\,080$ kWh/an

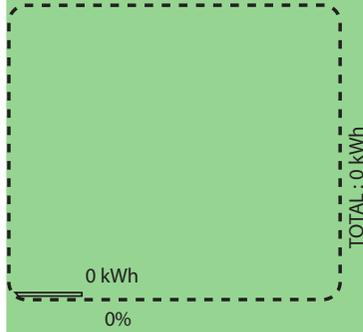
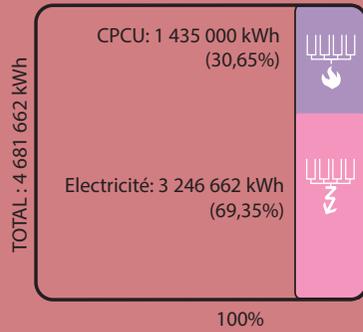
Biomasse Liquide :

L'implantation sur le parvis d'une petite usine de production de biomasse algale comportant 5 unités de 94 m³ chacune (réparties en 24 tubes de diamètre 0,5 m. et de hauteur 20 m.) soit 564 m³ permettrait à l'équipement de devenir un producteur important de biofuel : Un mètre cube de biomasse algale peut produire 2 873 litres de biodiesel par an. $2\,873 \times 564,48 = 1\,621\,751$ litres/an. Un litre de biodiesel correspond environ à 9 kWh. La production pourrait ainsi être de 14 596 000 kWh/an.

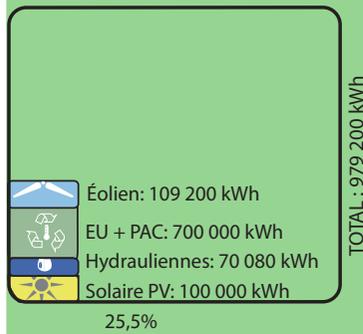
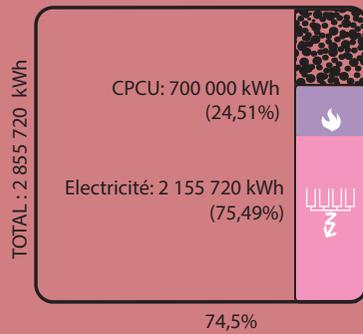
Globale

Locale

2014



2020



2050

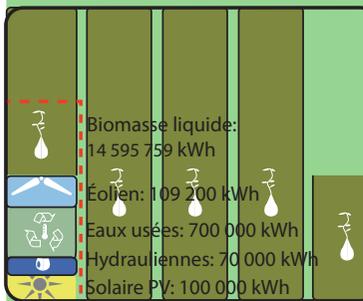


illustration 55 Institut du Monde Arabe : balance des productions globales et locales à 3 stades : 2014, 2020 et 2050, TH1 Villien

illustration 56 Institut du Monde Arabe : calcul des productions d'énergies locales de 2013 à 2050, TH1 Villien

Le bâtiment est connu pour son innovation technique, bien que son fonctionnement soit encore controversé. La petite tour urbaine d'angle et le patio intérieur sont des atouts morphologiques pour l'intégration de technologies de captage de gisements énergétiques.

CONSUMMATION ACTUELLE :

 **CPCU: 1 435 000 kWh** (30,65%)

 **Électricité: 3 246 662 kWh** (69,35%)

Nous faisons l'hypothèse d'une première vague de travaux d'économie d'énergie dans les prochaines années (remplacement des systèmes anciens par de plus récents plus économes) puis d'une seconde entre 2020 et 2050 portant le bâtiment à 50% de sa consommation actuelle (hors évolution prospective de notre part).

LES ACTEURS DE LA TRANSITION



Chauffage urbain :

L'Institut du Monde Arabe est entouré de réseaux urbains qui peuvent constituer une source d'énergie. Il est notamment actuellement relié au réseau de chauffage urbain.

Consommation annuelle moyenne : 1 435 000 kWh.



Solaire Photovoltaïque

L'Institut du Monde Arabe dispose d'une toiture terrasse d'environ 1000 m². Rendement : en moyenne 1 m² de capteurs = 100 Wc soit 100 kWh par an (pour un ensoleillement moyen de 1 000 kWh/kWc). 1 000 m² de panneaux solaires pourraient donc produire: 1 000 x 100 = 100 000 kWh/an.



Raccordement aux eaux usées:

Un échangeur placé dans le collecteur Saint Bernard (sous le quai Saint Bernard) est envisageable. Il s'agit d'un collecteur primaire dont la cunette présente une largeur de 100 cm pour une hauteur de 100 cm également. Ce système permet à l'école des Wattignies (12e arrondissement) une économie évaluée à plus de 50% d'énergie de chauffage.



Éolien:

Installation de 6 éoliennes de type Darrieus à axe vertical, plus performantes et subissantes moins de contraintes liées au milieu urbain, elles ont aussi l'avantage de capter le vent à 360°. Ces éoliennes ont une puissance de 7 kW. Il faut compter environ 30% d'utilisation optimale pour obtenir leur rendement (soit 30% de 8 760 heures = 2 600 h) : ainsi 7 x 2 600 x 6 = 109 200 kWh/an



Hydraulienne:

L'installation de 2 hydroturbines d'une puissance de 4kW aux endroits prescrits par la Mairie de Paris lors de son appel à projet aurait pour rendement : (4 x 8760) x 2 = 70 080 kWh/an



Biomasse Liquide:

L'implantation sur le parvis d'une petite usine de production de biomasse algale comportant 5 unités de 94 m³ chacune (réparties en 24 tubes de diamètre 0,5 m. et de hauteur 20 m.) soit 564 m³ permettrait à l'équipement de devenir un producteur important de biofuel : Un mètre cube de biomasse algale peut produire 2 873 litres de biodiesel par an. 2 873 x 564,48 = 1 621 751 litres/an. Un litre de biodiesel correspond environ à 9 kWh. La production pourrait ainsi être de 14 596 000 kWh/an.

illustration 57 Institut du Monde Arabe : état actuel en 2013, TH1 Villien



illustration 58 Institut du Monde Arabe : en 2050, simulation avec les productions d'énergies locales, côté Seine, TH1 Villien



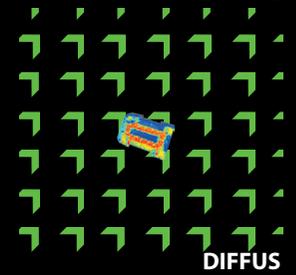
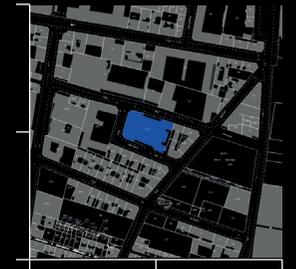
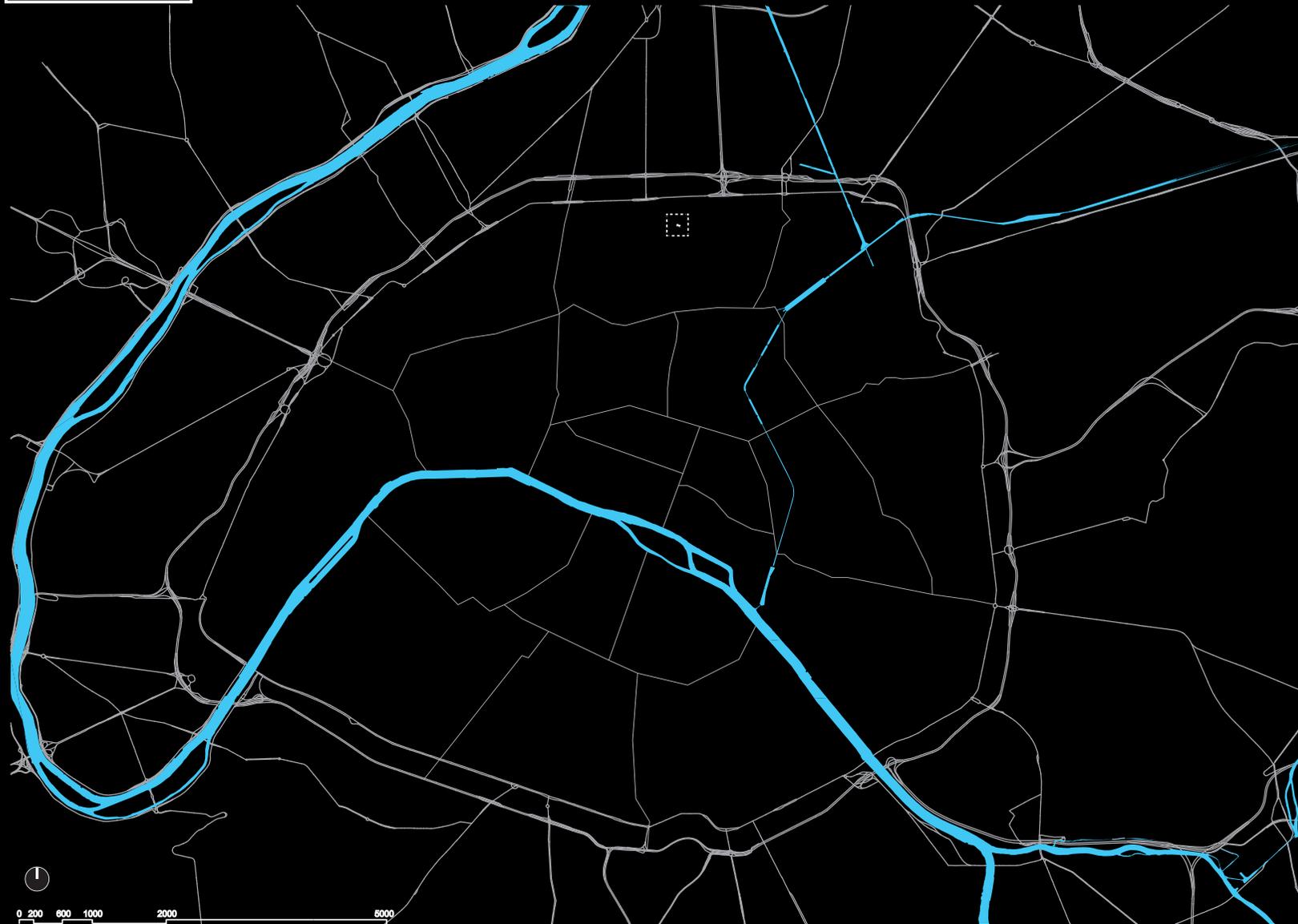
illustration 59 Institut du Monde Arabe : état actuel en 2013.



illustration 60 Institut du Monde Arabe : en 2050, simulation avec les productions d'énergies locales coté parvis.



Situation de l'équipement et gisements énergétiques locaux



DIFFUS

FLUX



POCHES

illustration 61 Situation de la piscine des Amiraux vis-à-vis de ses gisements locaux par types, TH1 Villien

5.3 Prospective sur la piscine des Amiraux

La piscine des Amiraux est située dans un quartier excentré et par là même ne bénéficie pas des avantages de la centralité : pas de métro, de grands collecteurs d'égouts proches du site. Par contre la forme en gradins si caractéristique de ce bâtiment joue pour nous un rôle essentiel et déclenchant. Il convient de souligner que cette forme pyramidale est justifiée dès l'origine par Henri Sauvage comme étant idéale pour l'ensoleillement des façades.

Par ailleurs ce dispositif en gradins est symétrique, côté Sud comme côté Nord. Il apparaît donc imaginable de modifier l'apparence de ce monument historique, de façon réversible bien entendu, du côté favorable à l'énergie solaire, en laissant l'apparence d'origine au côté Nord. Des panneaux photovoltaïques viennent produire là leur énergie fabriquant autant de protections solaires pour les balcons. Mais l'essentiel de l'énergie produite là proviendrait d'un autre gisement. Il s'agirait de produire là du biogaz

par un procédé de méthanisation des matières organiques. Ce gaz remplacerait celui utilisé actuellement comme énergie principale pour le chauffage de la piscine.

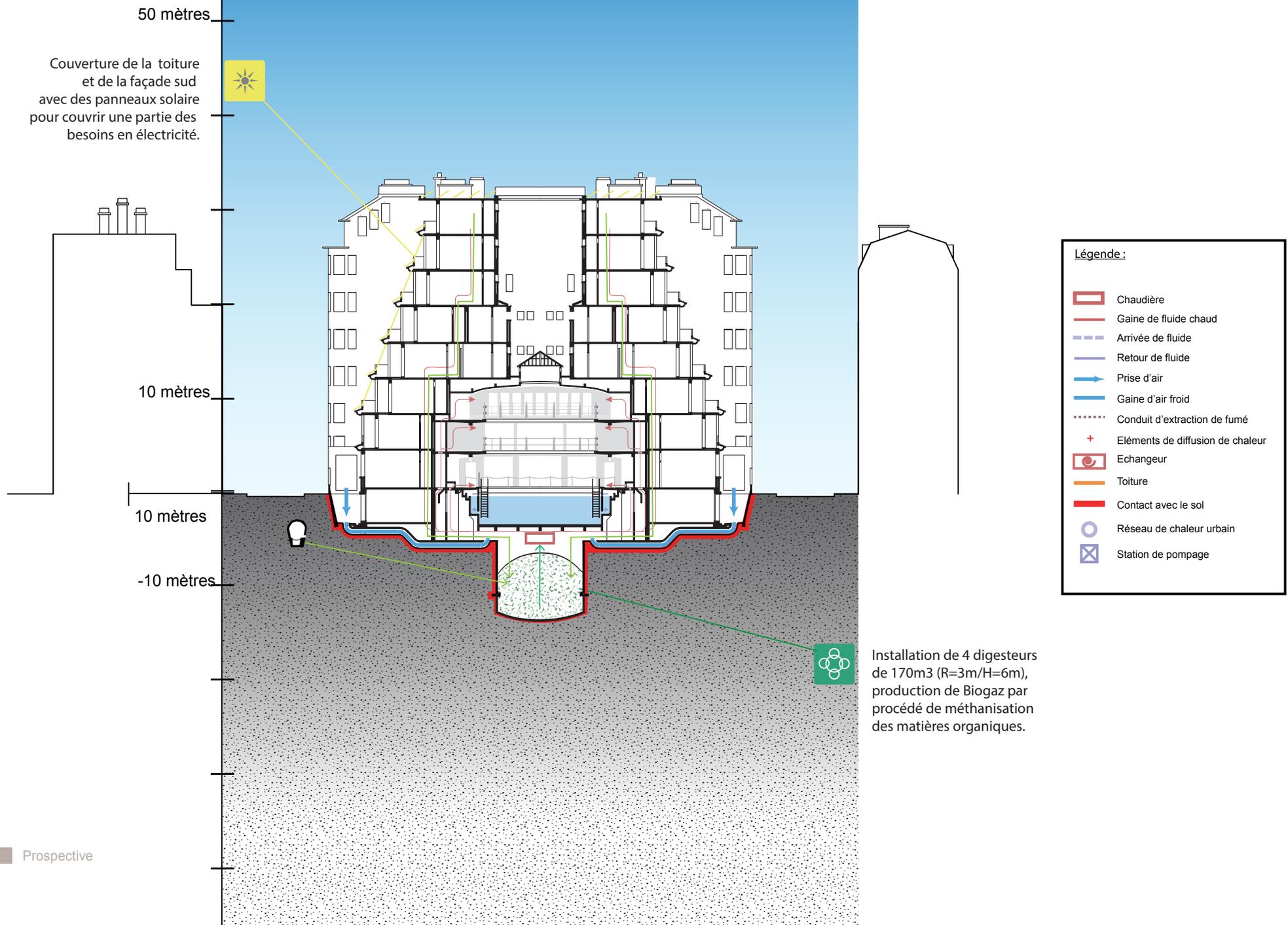
L'installation des digesteurs se ferait en accompagnant la remarquable spatialité du dispositif d'origine. Sous le bassin de la piscine, très en profondeur dans la coupe, en « cave », est aménagé actuellement le dispositif qui gère l'environnement de cette piscine.

L'installation de 4 digesteurs demanderait une profonde transformation de la structure et des travaux en sous-œuvre importants. Mais la singularité de cet équipement du point de vue énergétique serait décuplée. Il s'agit d'exprimer là la « métabolisme urbain » dans ce qu'il a de plus emblématique : collecter les déchets ménagers des habitants du quartier (environ 2 000 foyers dans notre simulation), les amener et les digérer au sein du bâtiment, conservant ses usages ludiques juste au dessus. Les logements « à bon marché » trouveraient là une valori-

sation méritée.

La maîtrise de l'air est ici le thème principal organisant les choix énergétiques. L'air a ici plusieurs états. Il est respirable et renouvelé, chargé en humidité avec une hygrométrie maîtrisée à des degrés divers selon les températures. Il est présent aussi sous la forme du biogaz, méthane utilisable pour la production d'une énergie locale de chauffage et d'électricité.

illustration 62 Piscine des Amiraux : coupe énergétique prospective, état 2050, TH1 Villien



Détails de la simulation

CONSOMMATION ACTUELLE :

Gaz : 1 568 791 kWh (54,30%)

Electricité : 1 321 239 kWh (45,70%)

Solaire Photovoltaïque :

En moyenne 1 m² de capteurs = 100 Wc soit 100 kWh par an (pour un ensoleillement moyen de 1 000 kWh/kWc). Ici, nous avons relevé un peu plus de 400 m² de toiture dont l'ensoleillement minimum est de 1 000 kWh.

À cela s'ajoute une cinquantaine de panneaux solaires de 2 m² coulissants en façade sud (balcons). Nous estimons donc que la pose de 500 m² de panneaux solaires en toiture permettrait un apport minimum de 50 000 kWh/an.

Production locale de biogaz :

Il s'agit d'un apport en énergie de type « biogaz / méthanisation des déchets » pour la piscine des Amiraux³³.

Nous cherchons à connaître l'ordre de grandeur de l'apport en énergie renouvelable locale de biogaz, produit par méthanisation des déchets ménagers, rapporté au territoire de la piscine des Amiraux. Bien entendu ceci ne constitue pas un calcul opérationnel mais bien une estimation selon un état actuel du savoir sur ces techniques. L'objectif est de cadrer une réponse à la question : combien de logements faudrait-il pour produire assez de « biogaz local » pour

33 Source utilisée pour le dimensionnement : DUBOIS Vincent (ENSAT), HERPIN Pierre (ENSIACET), "BIOGAZ / Méthane, calculs rendement et dimensionnement pour une valorisation des boues d'épuration », rapport rédigé dans le cadre de l'enseignement « Bureau d'Etudes Industrielles Énergies Renouvelables et Environnement (BEI ERE) », http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0405/beiere/4/html/bi-nome3/dim_inst.htm - consulté le 22 février 2014.

remplacer le gaz actuellement consommé pour les besoins de l'actuelle piscine des Amiraux? 20, 200, 2 000, 20 000 logements?

Commençons les calculs, en rassemblant les données nécessaires.

Selon la Mairie de Paris qui a lancé récemment un deuxième appel à candidature pour expérimenter le compost à l'échelle d'un immeuble parisien : « la quantité de biodéchets produite par un foyer, qui pourrait ainsi être détournée de la poubelle verte à ordures ménagères, est estimée entre 50 et 70 kg par an. Un immeuble, dans lequel habitent de 20 à 30 foyers, permettrait donc d'obtenir 1 à 2 tonnes de déchets organiques utilisables pour faire du compost. »

Ce qui est vrai pour le compost l'est aussi pour la méthanisation. Partant de ces ordres de grandeur, nous allons calculer la production potentielle de biogaz par an et donc d'énergie potentielle.

Prenons un immeuble Parisien de 30 logements dont les habitants jettent en moyenne 60 kg de matières organiques diverses par an. Tout d'abord, nous cherchons à connaître la quantité de déchets rejetés. $30 \times 60 = 1\,800$ kg/an.

1 kg de matière organique délivre en moyenne $0,5 \text{ m}^3$ de biogaz par processus de méthanisation (quel que soit le substrat cependant la durée du processus et la teneur en méthane varie). On cherche maintenant à obtenir le potentiel volumique de biogaz de ces déchets : $1\,800 \times 0,5 = 900 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{an}$.

Nous cherchons maintenant à obtenir la puissance potentielle délivrée en kWh par ce gaz. Le pourcentage de méthane et les conditions de température et de pression pouvant varier, nous allons minimiser sa PCI (puissance calorifique inférieure) à 65%, soit $6,46 \text{ kWh}/\text{m}^3$ (au lieu de $9,94 \text{ kWh}/\text{m}^3$ pour des conditions optimales), ainsi : $900 \times 6,46 = 5\,814 \text{ kWh}/\text{an}$.

À ce résultat, il est nécessaire de retirer environ 1/3 (compris énergie dépensée + pertes), soit

$7\,938 \text{ kWh}$. Il reste donc une énergie disponible de $3\,876 \text{ kWh}/\text{an}$.

Si ce résultat paraît faible c'est en partie parce que les moyens de mise en œuvre le sont aussi, nous pensons qu'une production non pas à l'échelle d'un immeuble mais d'un quartier pourrait avoir une plus grande signification dans sa production énergétique.

Nous allons maintenant à titre purement indicatif calculer le potentiel de la ville de Paris en nous basant uniquement sur les déchets rejetés par les foyers. Paris compte $1\,322\,000$ logements, ce qui (toujours en conservant une moyenne de 60 kg de matière organique rejetés/an) correspondrait à :

$1\,322\,000 \times 60 = 79\,320$ tonnes de déchets

($79\,320\,000 \text{ kg}$)/an

$79\,320\,000 \times 0,5 = 39\,660\,000 \text{ m}^3$ de biogaz

$6,46 \times 39\,660\,000 = 256\,203\,600 \text{ kWh}/\text{an}$

$256\,203\,600 \times 2/3 = 169\,094\,376 \text{ kWh}/\text{an}$

soit plus de 169 094,376 mégawatt-heure (MWh)

La quantité de biodéchets produite par un foyer, qui pourrait ainsi être détournée de la poubelle verte à ordures ménagères, est estimée entre 50 et 70 kg par an.

De plus, la quantité de selles (MS) des habitants d'un logement est évaluée à 138 kg ($200 \text{ g}/\text{jour}/\text{hab} \times 1,9 \text{ hab}/\text{log}$). Ainsi, un immeuble de 78 logements comme celui d'Henry Sauvage à la piscine des Amiraux délivre en moyenne ($238 \text{ kg} \times 78 \text{ lgts}$) 18,564 tonnes de matières organiques/an qui pourraient être converties en Biogaz/Méthane (CH_4)

1 kg de matière organique délivre en moyenne $0,5 \text{ m}^3$ de biogaz par processus de méthanisation (quel que soit le substrat cependant la durée du processus et la teneur en méthane varie). On cherche maintenant à obtenir le potentiel volumique de biogaz de ces déchets : $18\,564 \times 0,5 = 9\,282 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{an}$.

Nous cherchons maintenant à obtenir la puissance potentielle délivrée en kWh par ce gaz. Le pourcen-

tage de méthane et les conditions de température et de pression pouvant varier, nous allons minimiser sa PCI (puissance calorifique inférieure) à 65%, soit 6,46 kWh/m³ (au lieu de 9,94 kWh/m³ pour des conditions optimales), ainsi : **9 282 x 6,46 = 60 000 kWh/an**

Nous cherchons à savoir combien de logements faudrait-il pour remplacer intégralement le gaz consommé par la piscine des Amiraux par du Biogaz constitué uniquement à partir des biodéchets et des matières sèches des selles humaines.

Nous retirons ici les 60 000 kWh déjà comblés par les habitants de l'immeuble : (950 930 kWh - 60 000 kWh) / 6,46 (PCI) = 137 915 m³ Biogaz/an (besoins).

Nous cherchons maintenant la quantité (en kg) de déchets nécessaires : 137 915 / 0,5 = 275 829 kg

Nous pouvons maintenant obtenir le nombre de logements participants nécessaires : 275 829 / 138 =

7 998 logements. Soit environ 2% du parc de logements du 18ème arrondissement.

Installation et dimensionnement des digesteurs dans le sous-sol de la piscine :

Nous évaluons de façon optimiste la capacité d'accueil des sous-sols de la piscine des Amiraux à quatre digesteurs de 170 m³ chacun (volume effectif, rayon de 3 mètres et hauteur 6 mètres) en tenant compte du bullage.

Nous cherchons maintenant à définir la production de gaz (Bo) compte tenu d'un substrat de matière organique (Mo) disponible (en principe supérieur à la capacité d'accueil). Production observée (CAU Strasbourg) : environ 227 m³ CH₄/m³ par digesteur/an. Soit pour 680 m³ : 227 x 680 = 154 564 m³ CH₄/an.

Le PCI du méthane vaut 9,94 kWh/m³ dans les conditions normales de température et de pression (Lafarge, 1995). A 65 % de méthane, il vaut

6,46 kWh/m³.

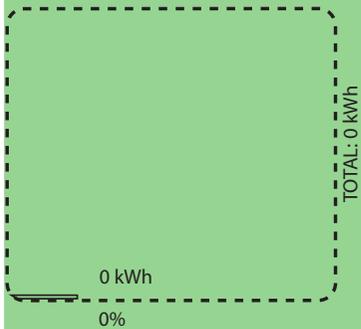
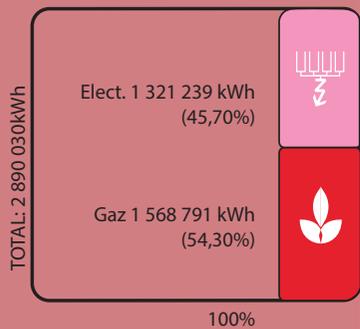
Ainsi la production optimale d'énergie du biogaz serait de :

154 564 x 6,46 = 998 483 kWh/an.

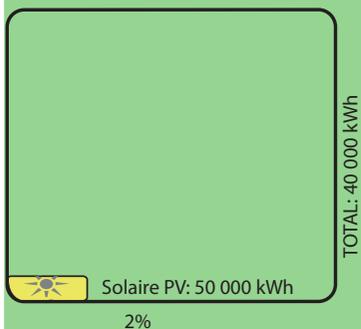
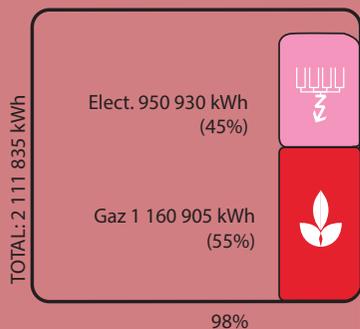
Globale

Locale

2014



2020



2050

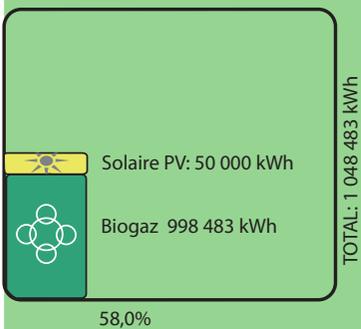
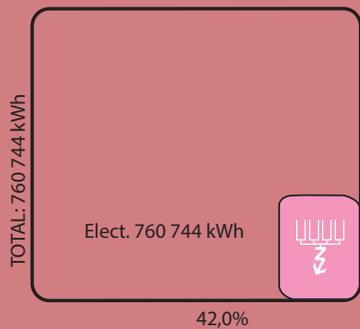


illustration 63 Piscine des Amiraux : balance des productions globales et locales à 3 stades : 2014, 2020 et 2050, TH1 Villien

<

illustration 64 Piscine des Amiraux : calcul des productions d'énergies locales de 2013 à 2050, TH1 Villien

>

CONSUMMATION ACTUELLE :



Gaz: 1 568 791 kWh (54,30%)



Electricité: 1 321 239 kWh (45,70%)

LES ACTEURS DE LA TRANSITION



Production locale de biogaz :

Il s'agit d'un apport en énergie de type « biogaz / méthanisation des déchets » pour la piscine des Amiraux. Nous cherchons à connaître l'ordre de grandeur de l'apport en énergie renouvelable locale de biogaz, produit par méthanisation des déchets ménagers, rapporté au territoire de la piscine des Amiraux. Bien entendu ceci ne constitue pas un calcul opérationnel mais bien une estimation selon un état actuel du savoir sur ces techniques. L'objectif est de cadrer une réponse à la question : combien de logements faudrait-il pour produire assez de « biogaz local » pour remplacer le gaz actuellement consommé pour les besoins de l'actuelle piscine des Amiraux? 20, 200, 2 000, 20 000 logements?

Commençons les calculs, en rassemblant les données nécessaires. Selon la Mairie de Paris qui a lancé récemment un deuxième appel à candidature pour expérimenter le compost à l'échelle d'un immeuble parisien : « la quantité de biodéchets produite par un foyer, qui pourrait ainsi être détournée de la poubelle verte à ordures ménagères, est estimée entre 50 et 70 kg par an. Un immeuble, dans lequel habitent de 20 à 30 foyers, permettrait donc d'obtenir 1 à 2 tonnes de déchets organiques utilisables pour faire du compost. » Ce qui est vrai pour le compost l'est aussi pour la méthanisation. Partant de ces ordres de grandeur, nous allons calculer la production potentielle de biogaz par an et donc d'énergie potentielle.

Prenons un immeuble Parisien de 30 logements dont les habitants jettent en moyenne 60 kg de matières organiques diverses par an. Tout d'abord, nous cherchons à connaître la quantité de déchets rejetés. $30 \times 60 = 1\,800$ kg/an. 1 kg de matière organique délivre en moyenne $0,5 \text{ m}^3$ de biogaz

par processus de méthanisation (quel que soit le substrat cependant la durée du processus et la teneur en méthane varie). On cherche maintenant à obtenir le potentiel volumique de biogaz de ces déchets : $1\,800 \times 0,5 = 900 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{an}$. Nous cherchons maintenant à obtenir la puissance potentielle délivrée en kWh par ce gaz. Le pourcentage de méthane et les conditions de température et de pression pouvant varier, nous allons minimiser sa PCI (puissance calorifique inférieure) à 65%, soit $6,46 \text{ kWh/m}^3$ (au lieu de $9,94 \text{ kWh/m}^3$ pour des conditions optimales), ainsi : $900 \times 6,46 = 5\,814 \text{ kWh/an}$. À ce résultat, il est nécessaire de retirer environ 1/3 (compris énergie dépensée + pertes), soit $1\,938 \text{ kWh}$. Il reste donc une énergie disponible de $3\,876 \text{ kWh/an}$.

Si ce résultat paraît faible c'est en partie parce que les moyens de mise en œuvre le sont aussi, nous pensons qu'une production non pas à l'échelle d'un immeuble mais d'un quartier pourrait avoir une plus grande signification dans sa production énergétique. Nous allons maintenant à titre purement indicatif calculer le potentiel de la ville de Paris en nous basant uniquement sur les déchets rejetés par les foyers. Paris compte $1\,322\,000$ logements, ce qui (en conservant une moyenne de 60 kg de matière organique rejetés/an) correspondrait à : $1\,322\,000 \times 60 = 79\,320$ tonnes de déchets ($79\,320\,000 \text{ kg}/\text{an}$)

$79\,320\,000 \times 0,5 = 39\,660\,000 \text{ m}^3$ de biogaz

$6,46 \times 39\,660\,000 = 256\,203\,600 \text{ kWh/an}$

$256\,203\,600 \times 2/3 = 169\,094\,376 \text{ kWh/an}$

soit plus de $169\,094,376$ mégawatt-heure (MWh)

La quantité de biodéchets produite par un foyer, qui pourrait ainsi être détournée de la poubelle verte à ordures ménagères, est estimée entre 50 et 70 kg par an. De plus, la quantité de selles (MS) des habitants d'un logement est évaluée à 138 kg ($200 \text{ g}/\text{jour}/\text{hab} \times 1,9 \text{ hab}/\text{log}$). Ainsi, un immeuble de 78 logements comme celui d'Henry Sauvage à la piscine des Amiraux délivre en moyenne ($238 \text{ kg} \times 78 \text{ lgts}$) $18,564$ tonnes de matières organiques/an qui pourraient être converties en Biogaz/Méthane (CH_4). 1 kg de matière organique délivre en moyenne $0,5 \text{ m}^3$ de biogaz par processus de méthanisation (quel que soit le substrat cependant la durée du processus et la teneur en méthane varie). On cherche maintenant à obtenir le potentiel volumique de biogaz de ces déchets : $18\,564 \times 0,5 = 9\,282 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{an}$.

Nous cherchons maintenant à obtenir la puissance potentielle délivrée en kWh par ce gaz. Le pourcentage de méthane et les conditions de température et de pression pouvant varier, nous allons minimiser sa PCI (puissance calorifique inférieure) à 65%, soit $6,46 \text{ kWh/m}^3$ (au lieu de $9,94 \text{ kWh/m}^3$ pour des condi-

tions optimales), ainsi : $9\,282 \times 6,46 = 60\,000 \text{ kWh/an}$
Nous cherchons à savoir combien de logements faudrait-il pour remplacer intégralement le gaz consommé par la piscine des Amiraux par du Biogaz constitué uniquement à partir des biodéchets et des matières sèches des selles humaines. Nous retirons ici les $60\,000 \text{ kWh}$ déjà comblés par les habitants de l'immeuble : $(950\,930 \text{ kWh} - 60\,000 \text{ kWh}) / 6,46$ (PCI) = $137\,915 \text{ m}^3 \text{ Biogaz/an}$ (besoins).
Nous cherchons maintenant la quantité (en kg) de déchets nécessaires : $137\,915 / 0,5 = 275\,829 \text{ kg}$

Nous pouvons maintenant obtenir le nombre de logements participants nécessaires : $275\,829 / 138 = 1\,998$ logements. Soit environ 2% du parc de logements du 18ème arrondissement.

Installation et dimensionnement des digesteurs dans le sous-sol de la piscine :

Nous évaluons de façon optimiste la capacité d'accueil des sous-sols de la piscine des Amiraux à quatre digesteurs de 170 m^3 chacun (volume effectif, rayon de 3 mètres et hauteur 6 mètres) en tenant compte du bullage.

Nous cherchons maintenant à définir la production de gaz (Bo) compte tenu d'un substrat de matière organique (Mo) disponible (en principe supérieur à la capacité d'accueil). Production observée (CAU Strasbourg) : environ $227 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3$ digesteur/an. Soit pour 680 m^3 : $227 \times 680 = 154\,564 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{an}$. Le PCI du méthane vaut $9,94 \text{ kWh/m}^3$ dans les conditions normales de température et de pression (Lafarge, 1995). A 65 % de méthane, il vaut $6,46 \text{ kWh/m}^3$.

Ainsi la production optimale d'énergie du biogaz serait de : $154\,564 \times 6,46 = 998\,483 \text{ kWh/an}$.



Solaire Photovoltaïque :

En moyenne 1 m^2 de capteurs = 100 Wc soit 100 kWh par an (pour un ensoleillement moyen de 1 000 kWh/kWc). Ici, nous avons relevé un peu plus de 400 m² de toiture dont l'ensoleillement minimum est de 1 000 kWh.

À cela s'ajoute une cinquantaine de panneaux solaires de 2 m^2 coulissants en façade sud (balcons). Nous estimons donc que la pose de 500 m^2 de panneaux solaires en toiture permettrait un apport minimum de $50\,000 \text{ kWh/an}$.

illustration 65 Piscine des Amiraux côté Sud :
état actuel 2013, TH1 Villien





illustration 66 Piscine des Amiraux : en 2050, simulation avec les productions d'énergies locales côté Sud, TH1 Villien

Conclusion

Cette prospective débouche sur quelques convictions et sur de nombreuses pistes de travail et de réflexion. Le nuage de mots³⁴ (*illustration 67*) accompagnant cette conclusion illustre les grands thèmes fondateurs à développer.

Les **futurs territoires énergétiques positifs, les TEPOS**, seront selon nous très dépendants de la mutation énergétique des équipements majeurs du territoire parisien. Pour les édifices étudiés jusqu'à l'échelle S nous avons esquissé une prospective énergétique dans la trajectoire de la « **diversité** ». Et nous le faisons **en optant pour des « mix » énergétiques locaux**. Cette proximité est très importante pour conserver une lisibilité à la transition énergétique.

34 Ce nuage de mots est fabriqué sur www.tagxedo.com. A partir de l'ensemble des 12 000 mots de ce chapitre prospectif, en éliminant les mots peu significatifs, avec un "spread" de 200, les principaux mots utilisés dans ce chapitre sont assumés ici comme significatifs des thèmes développables.

La logique de la coupe, de l'échelle générale à celle de l'édifice, est notre principale garantie pour inscrire la spatialité au cœur de la méthode de la transition énergétique.

La constitution des TEPOS métropolitains doit ainsi reposer sur une cohérence spatiale et non principalement sur une logique technique et monopolistique.

Ces conditions posées nous pourrions enfin avoir, nous les concepteurs de territoire, architecte, urbanistes, ingénieurs, paysagistes, **une inventivité énergétique**, de la « cave à la canopée ».

Bibliographie Energies

Prix des énergies à Paris dans les comptes généraux des Hospices (an XI -1940) 1M1 à 18, 4 M1-232 archives de l'Assistance publiques des hôpitaux de Paris.

d'Avenel Vicomte Georges, *Histoire économique de la propriété, des salaires, des denrées et de tous les prix en général depuis l'an 1200 jusqu'en l'an 1800*, E. Leroux, Paris, 1894-1912.

Carré, J.-J., Dubois, P., & Malinvaud, E., *La croissance française*, Seuil, (2e ed.), Paris, 1976

Chadeau, E., & Caron, F., *L'économie nationale aux XIXe et XXe siècle*, Presses de l'École normale supérieure, Paris, 1983

Sauvy, A., *Étude sur le revenu national. Rapport au Conseil Économique*, séance du 24 mars 1954, Imprimerie nationale, Paris, 1954

Singer-Kerel Jeanne, *Le coût de la vie à Paris de 1840 à 1954*, Armand Colin, Paris, 1961.

Bibliographie Prospective

Banham Reyner, *L'architecture de l'environnement bien tempéré*, 1969, Architectural Press, Londres, traduction en français, éd. HYX, 2011, 334 pages

Franck Boutté Consultants, "TEGPOS", <http://franck-boutte.com/?p=3639> - consulté le 29 octobre 2013

Cochet Yves, Dupuy Jean-Pierre, George Susan, Latouche Serge, *Où va le monde? 2012-2022 : Une décennie au devant des catastrophes*, 2012, éd. Mille et une nuits, 76 p.

Daumas Maurice (sous la direction de), *Évolution de la géographie industrielle de Paris et sa proche banlieue au XIXe siècle*, 1976, CDHT-CNAM, 2 tomes, 617 p, accompagné d'un atlas de 55 planches élaboré par Jigaudon.

Guzowski Mary, *Toward Zero-energy Architecture, New solar design*, 2010, Laurence King, 208 p.

Hegger Manfred, Stark Thomas, Fuchs Matthias, Zeumer Martin, *Construction et énergie, architecture et développement durable*, 2011, Details, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 280 p.

Jacquemet Gérard, *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, année 1978, volume 33, numéro 3, pp. 557-558, à propos des qualités exceptionnelles de

l'atlas de Daumas. http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/ahess_03952649_1978_num_33_3_293947_t1_0557_0000_001 - dernière consultation 30 mars 2014.

Meadows Denis, Meadows Donella, Randers Jorgen, *Les limites à la croissance dans un monde fini*, 2012, Rue de l'échiquier, 425 p.

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Conseil National pour la Transi-

tion énergétique, *Sur la transition énergétique » Imaginons ensemble notre énergie de demain, les Cahiers d'Acteurs, rapports du groupe de travail du Conseil National*. Avril 2013. Les cahiers sont répartis par rapport aux 7 groupes de travail.

Picon Antoine, Robert Jean-Paul, *Un atlas parisien, Le dessus des cartes*, 1999, éd. du Pavillon de l'Arsenal, 287 p.

Rifkin Jeremy, *La troisième révolution industrielle, comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, Les Liens qui Libèrent, 2012

Agence Régionale de L'Environnement et des Nouvelles Énergie Île-de-France, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, *Tableau de Bord de l'énergie en Île-de-France*, 2012, 23 p.

Mairie de Paris, *Bleu Climat 2012, L'engagement de la collectivité parisienne en matière de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et d'efficacité énergétique*, version finale 2012, 79 p.

Mairie de Paris « Énergies Renouvelables, je produis mon énergie », *Habiter Durable*, n° 1, avril, 2013, 11 p.

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) ; L'Énergie en France, état des lieux et perspectives, Juillet, 2012, 27 p.

DRIEE, Conseil Régional IDF et ADEME, Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Énergie de l'Île-de-France, Synthèse, 23 p.

Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Énergie Île-de-France, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, Consommation d'énergie des bâtiments franciliens d'enseignement, Synthèse, octobre, 2011, 28 p.

<http://www.connaissancedesenergies.org>
<http://www.territoires-energie-positive.fr>
<http://www.ecosources.info>
<http://roseidf.org>

BIOMASSE, BIOGAZ & BIOCARBURANTS :

GRDF, *Biométhane de microalgues, évaluation du potentiel du potentiel de production en France aux horizons 2020 et 2050*, Rapport Final – février, 2013, 143 p.

Crolla Anna, Kinsley Chris, Pattey Elizabeth, *La digestion anaérobie : biogaz et les impacts environnementaux*, Document de conférence - Université de Guelph - Campus d'Alfred ADEME, GDF direction des recherches, RDC Environnement, Bio Intelligence Service, *Analyse du Cycle de Vie des modes de valorisation énergétique du biogaz issu de méthanisation de la Fraction Fermentescible des ordures ménagères collectées sélectivement en France*, Synthèse, 2007, 61 p.

RÉGION Île-de-France, ADEME, *Synthèse de l'étude préalable à l'élaboration du volet combustion de la Biomasse en filière collective du Schéma Régional Climat Air Énergie (SRCAE) d'Île-de-France*, Synthèse, Révision 2 (20 juillet 2012), 36 p. Atelier Parisien d'Urbanisme, *Données cartographique (SIG) des arbres propriété de la Ville de Paris*.

« Algocultures » Exposition et laboratoire public d'architecture pour la construction de biofaçades”, exposition du 7 décembre 2013 au 9 février 2014 du projet «Algocultures» conçu par les architectes de l'agence XTU et les ingénieurs d'AlgoSource Technologies. Dossier de presse : http://www.pavillon-arsenal.com/img/exposition/272/cp/PAV_272_CP.pdf - dernière consultation 30 mars 2014.

CHAUFFAGE URBAIN :

Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie (DRIEE), *Évaluation du potentiel de développement du chauffage urbain en Île-de-France, Document d'analyse réalisé à partir de l'étude sur les réseaux de chaleur contributive à l'élaboration du Schéma Régional Climat Air Énergie*, 2012, 69 p. Atelier Parisien d'Urbanisme, *Les réseaux de chaleur à Paris et en petite couronne*, 2006, 18 p. <http://www.cpcu.fr>

DATA CENTERS :

Liu Jie, Goraczko Michel, James Sean, Belady Christian (Microsoft Research), Lu Jiakang, Whitehouse Kamin (Computer Science Department University of Virginia), *The Data Furnace : Heating Up with Cloud Computing*, 5 p.

www.datacenter9.com : localisation des *data centers* français communiqués, 2013

CHALEUR FATALE EAUX USÉES, ÉGOUTS :

Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB), *Étude des potentialités de récupération des calories des eaux usées pour les sites de projet du territoire communautaire, Rapport d'étude définitif*, 16/02/10, 49 p.

SUEZ environnement, Lyonnaise des Eaux, Degrés Bleus, *Récupération et valorisation des calories des réseaux d'assainissement*, document de conférence du 05/11/2010.

Mairie de Paris et le CPCU, *Énergies renouvelables : un groupe scolaire parisien chauffé grâce à la chaleur des égouts*, Dossier de presse, avril 2011, 6 p.

ÉOLIEN :

Région Île-de-France, *schéma régional éolien en Île-de-France*, 2012, 30 p.

ÉOLIEN, *Documentation technique sur les modèles stato-éoliens*.

Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Énergies (ARENE) Île-de-France, *Atlas Éolien pour l'Île-de-France*, disponible sur «<http://www.arenidf.org>»

Syndicat des énergies renouvelables, France énergie éolienne, *L'Éolien en Île-de-France*, Rapport, 2011, 11 p.

GÉOTHERMIE :

Office Fédéral de l'Énergie (OFEN), SUISSE énergie, *L'utilisation de la chaleur terrestre Aperçu, technologies, visions, rapport*, 28 p.

Bel A., Poux A., Goyénèche O., Allier D., Darrigau G., Lemale J., (ADEME, BRGM, Région Île-de-France), *Synthèse de l'étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Île-de-France*, Rapport final, 2012, 21 p.

HYDRAULIQUE :

Mairie de Paris (direction des espaces verts et de l'environnement) + Voies Navigables de France, *Dossier de Consultation : Expérimentation d'hydroliennes dans la Seine ou de tout dispositif de production d'énergie électrique à partir de la force motrice du fleuve*, 2010, 17 p.

CHALEUR FATALE MÉTRO ET RER :

http://www.lexpress.fr/actualites/2/la-chaleur-humaine-du-metro-parisien-pour-chauffer-des-logements_917025.html

Allix G., « L'air chaud du métro, nouvelle source possible de chauffage dans les villes », *Le Monde*, 22 septembre 2010.

Mairie de Paris, *Plan local d'urbanisme, annexe : servitudes d'utilité publique, infrastructures aériennes et souterraines du métro et du RER y compris les ouvrages de raccordement*.

RESEAU DE FROID :

Climespace (<http://www.climespace.fr>), carte du réseau de froid

Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest + Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, *Documentation réseau de chaleur et réseau de froid*, 2 p.

SOLAIRE :

Mairie de Paris, « Panneaux Solaires, je produis mon énergie », *Habiter Durable*, n°, octobre, 2012, 12 p.

<http://www.cadastresolaire.paris.fr>
ARENE Île-de-France (www.arenidf.org), *Le solaire photovoltaïque en région Île-de-France : une filière en pleine expansion*. ed. octobre 2010