

# Etude de faisabilité ENR – Palais de Tokyo

22 septembre 2023



PALAIS  
DE TOKYO



## Table des matières

<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
<b>2 INVENTAIRE DU POTENTIEL EN ENERGIES RENOUVELABLES .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Inventaire des ENR envisageables .....</b>	<b>5</b>
2.1.1 La géothermie .....	5
2.1.2 Les énergies de récupération.....	6
2.1.3 La biomasse.....	7
2.1.4 L'énergie solaire.....	8
2.1.5 L'éolien .....	8
2.1.6 L'énergie micro hydraulique.....	10
<b>2.2 Synthèse des ENR retenues .....</b>	<b>10</b>
<b>3 ETUDE DU POTENTIEL ENERGETIQUE .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Périmètre des investissements.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 Hypothèses techniques et économiques .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3 Récupération de chaleur sur eaux usées avec système de production.....</b>	<b>14</b>
3.3.1 Dimensionnement technique .....	14
3.3.2 Caractéristiques financières.....	15
3.3.3 Impact carbone .....	15
3.3.4 Contraintes.....	15
<b>3.4 Récupération de chaleur sur eaux usées passive .....</b>	<b>18</b>
3.4.1 Dimensionnement technique .....	18
3.4.2 Caractéristiques financières.....	19
3.4.3 Impact carbone .....	19
3.4.4 Contraintes.....	19
<b>3.5 ECS thermodynamique .....</b>	<b>21</b>
3.5.1 Dimensionnement technique .....	21
3.5.2 Caractéristiques financières.....	22
3.5.3 Impact carbone .....	22
3.5.4 Contraintes.....	23
<b>3.6 Solaire thermique.....</b>	<b>24</b>
3.6.1 Dimensionnement technique .....	24
3.6.2 Caractéristiques financières.....	25
3.6.3 Impact carbone .....	26
3.6.4 Contraintes.....	26
<b>3.7 Solaire photovoltaïque .....</b>	<b>27</b>
3.7.1 Dimensionnement technique .....	27
3.7.2 Caractéristiques financières.....	27

<b>3.7.3</b>	<b>Impact carbone .....</b>	<b>28</b>
<b>3.7.4</b>	<b>Contraintes.....</b>	<b>28</b>
<b>3.7.5</b>	<b>Verrière photovoltaïque.....</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>SYNTHESE.....</b>	<b>33</b>

## 1 INTRODUCTION

L'objet du document est de présenter l'étude de faisabilité du potentiel en énergies renouvelables du Palais de Tokyo.

**Nota :** Le présent document n'est ni un diagnostic ni un programme environnemental.

La méthodologie retenue est la suivante :

- Inventaire des énergies renouvelables envisageables sur le site
- Analyse technique pour identifier les ENR non pertinentes au vu des contraintes et des spécificités du site
- Etude de faisabilité technico-économique des ENR pertinentes
- Analyse comparative des solutions ENR

L'étude est conduite sur les 3 postes de consommations suivants :

- Climatisation
- Electricité
- ECS

Les solutions ENR destinées à couvrir les besoins de chauffage n'ont pas été étudiées, le site étant déjà raccordé au réseau de chaleur urbain CPCU qui présente un taux d'ENR de 51%, ce qui constitue une solution d'approvisionnement énergétique d'ores et déjà vertueuse.

## 2 INVENTAIRE DU POTENTIEL EN ENERGIES RENOUVELABLES

### 2.1 Inventaire des ENR envisageables

#### 2.1.1 La géothermie

Il existe trois différents types de géothermie selon la profondeur : la géothermie à très faible et faible énergie (température inférieure à 90°C), la géothermie de moyenne énergie (température supérieure à 90°C) et la géothermie de haute énergie (température supérieure à 150°C).

La géothermie permet la production d'eau chaude ou tempérée à partir des ressources énergétiques du sous-sol.

##### ■ La géothermie moyenne et haute énergie

Ces types de géothermie nécessitent des forages à plus de 2500 m de profondeur. Les besoins du projet ne justifient pas l'installation de ce type de géothermie

##### ■ La géothermie basse énergie

Plusieurs solutions d'utilisation de la géothermie sont possibles :

- Si la présence d'une nappe exploitable est confirmée par un forage de reconnaissance : puisage et pompe à chaleur tirant parti de la température stable de l'aquifère,
- Dans tous les cas : pompe à chaleur et sondes géothermiques disposées en nappe horizontale dans des tranchées, ou sous forme de pieux verticaux.

Le principe de la géothermie sur nappe consiste à prélever des calories (ou des frigories) dans la nappe qui présente une température assez stable toute l'année pour la transférer, via une pompe à chaleur, vers un circuit de chauffage (ou de climatisation), moyennant une faible dépense d'énergie.

Pour cela, on utilise un doublet géothermique composé :

- D'un puits de pompage de l'eau, qui permet d'alimenter le circuit et de fournir, selon la saison, des calories (en hiver) ou des frigories (en été), la nappe restant sensiblement à la même température toute l'année ;
- D'un forage de réinjection, qui permet de restituer l'eau dans sa nappe d'origine, avec le même débit que le pompage mais à une température différente (plus basse en hiver et plus élevée en été)

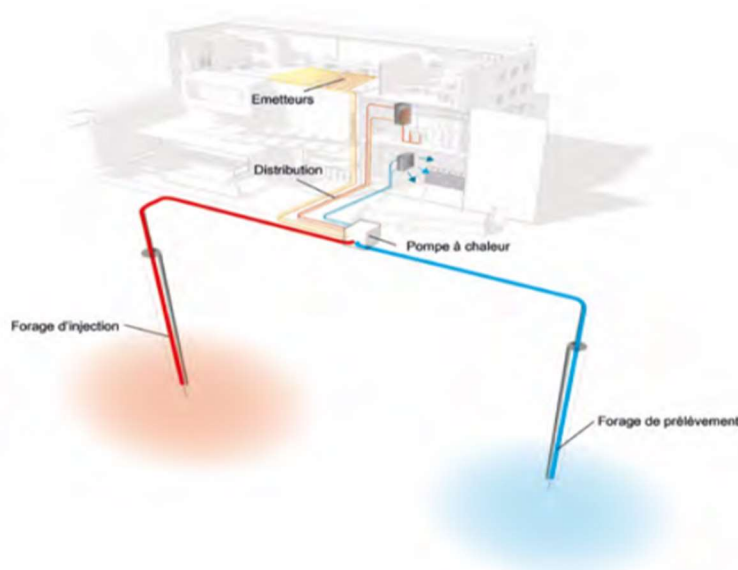


FIGURE 1 : SCHEMA D'UN SYSTEME DE GEOTHERMIE SUR AQUIFERE



Concernant la géothermie sur pieux ou sondes, le principe consiste à faire circuler, en circuit fermé, un liquide caloporteur dans plusieurs sondes verticales.

Ce champ est constitué d'un réseau de tubes, disposés à la verticale dans des forages, qui échange l'énergie (par simple transfert de chaleur) et l'achemine jusqu'à la pompe à chaleur, qui permet ensuite de distribuer la chaleur dans le bâtiment.

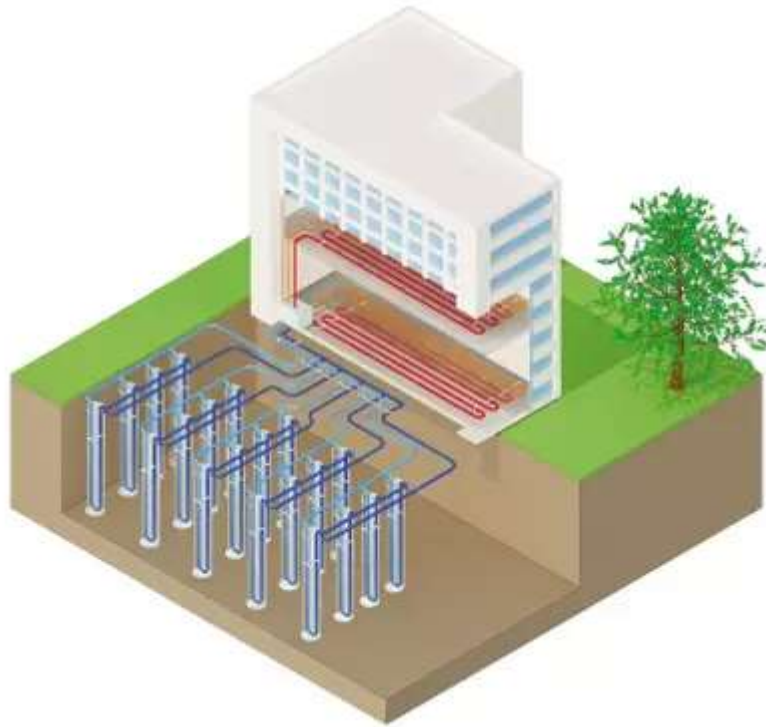


FIGURE 2 : GEOTHERMIE SUR SONDES (SOURCE : BRGM)

### 2.1.2 Les énergies de récupération

On distingue deux types de récupération de chaleur.

#### ■ Récupération de chaleur sur eaux grises passives

Cette technique consiste à réutiliser les calories présentes dans les eaux usées pour préchauffer l'ECS. Les eaux usées passent dans un échangeur qui va réchauffer l'eau froide avant qu'elle n'arrive dans le ballon ECS. Ce type de dispositif possède un temps de retour intéressant, souvent de l'ordre de 3 à 6 ans et permet de réduire les consommations ECS de 20 à 30%.

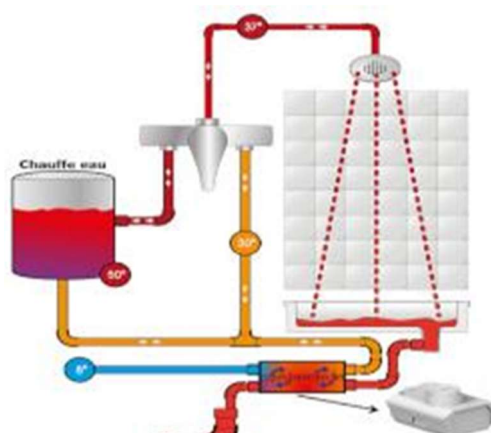


FIGURE 3 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA RECUPERATION DE CHALEUR SUR EAUX GRISES

### ■ Production de chaleur à l'aide des eaux grises

Ce type d'équipement est constitué d'un échangeur eau/eau et d'une pompe à chaleur. Il présente un intérêt pour les cas où il existe, sur un même site, rejets et besoins d'eau chaude. Les eaux usées sont filtrées (graisses et résidus) puis stockées dans une cuve isolée à 30°C. Les eaux usées passent dans la PAC (Module thermodynamique) à une température moyenne de 30°C et ressortent à 7°C. L'eau provenant d'un ballon de préchauffage passe, via le circuit condenseur de la PAC (module thermodynamique) de 10°C à 58°C pour la production d'eau chaude sanitaire. Il serait possible de couvrir 100% des besoins en ECS avec cette installation.

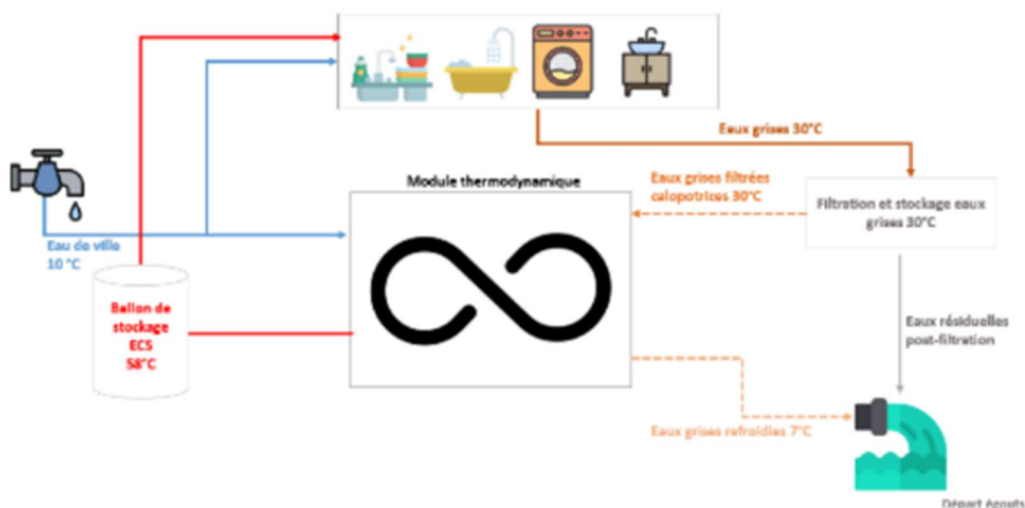


FIGURE 4 : PRODUCTION DE CHALEUR A L'AIDE DES EAUX GRISSES

### 2.1.3 La biomasse

L'énergie biomasse est la principale source d'énergie renouvelable en France. Cette biomasse est issue de la forêt, de l'agriculture et déchets de la restauration, de la distribution, des stations d'épuration, etc.

Les chaufferies biomasse mobilisant du bois-énergie sont des équipements dont la durabilité et la performance a été prouvée à travers de nombreux exemples sur le territoire.

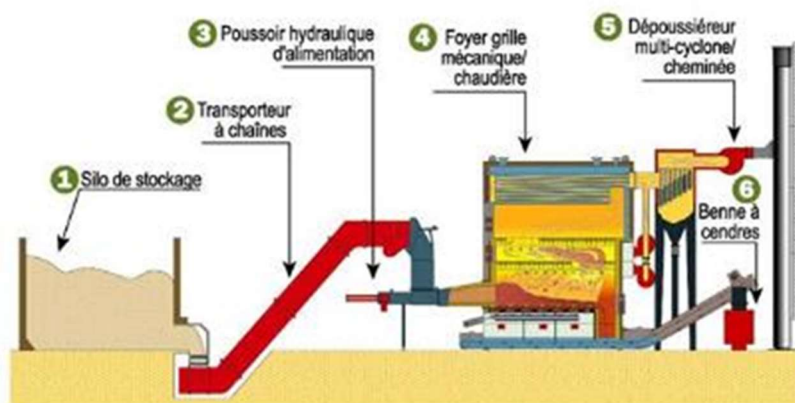


FIGURE 5 : SCHEMA DE PRINCIPE BOIS ENERGIE

Une installation fonctionnant au bois-énergie nécessite l'intégration d'un silo de stockage de taille variable selon le volume et la fréquence de l'approvisionnement.

## 2.1.4 L'énergie solaire

L'énergie solaire peut être valorisée sous deux formes :

- Le solaire thermique pour la production d'eau chaude (chauffage et/ou ECS)
- Le solaire photovoltaïque pour la production d'électricité

### ■ Solaire thermique

La technologie solaire thermique consiste à récupérer de l'énergie solaire, connue pour son intermittence, afin de répondre à des besoins.

Les capteurs solaires transforment le rayonnement solaire en chaleur grâce à un absorbeur : un corps noir caractérisé par des propriétés d'absorption très élevées et d'émissivité très basse. Celui-ci transfère la chaleur à un fluide caloporteur circulant au travers de chacun des capteurs.

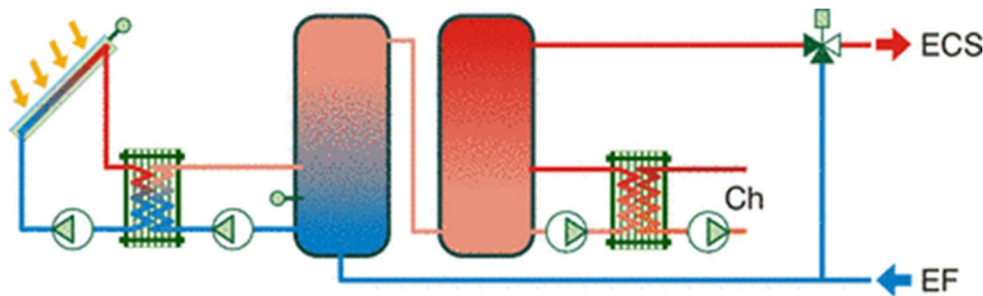


FIGURE 6 : SCHEMA D'UN DISPOSITIF DU SOLAIRE THERMIQUE

### ■ Solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques produisent de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire grâce à des matériaux semi-conducteurs comme le silicium. L'électricité produite est sous forme de courant continu, il faut donc lui adjoindre un onduleur pour la transformer en courant alternatif avant de l'injecter sur le réseau ou de l'autoconsommer.

La production électrique des panneaux photovoltaïques est très dépendante de la saison et de l'heure de la journée. Il est cependant facile d'y recourir en autoconsommation pour des bâtiments tertiaires car leurs pics de production coïncident généralement avec la consommation électrique. Comme les besoins ne sont jamais totalement synchrones avec la production il convient de correctement dimensionner une installation photovoltaïque lorsque l'on envisage l'autoconsommation afin de ne pas générer de trop grandes pertes électriques qui dégraderaient la rentabilité de l'installation.

Les panneaux nécessitent un emplacement dégagé, peu d'ombrage et d'être hors de portée de possibles dégradations. Des toitures avec une présence d'équipements limitée ou des ombrières de parking sont des lieux idéaux.

## 2.1.5 L'éolien

L'éolien se divise en 4 technologies principales :

- Petit éolien – hauteur inférieure à 12 mètres (de moins de 1 kW jusqu'à 36 kW)
- Moyen éolien – hauteur comprise entre 12 et 50 mètres (de 36 kW à 250 kW)
- Grand éolien – hauteur supérieure à 50 mètres (de plus de 250 kW)
- Eolien urbain

Le grand et le moyen éolien sont incompatibles avec une installation en milieu urbain dense. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils de manière économique et durable, principalement en milieu rural ou en site isolé. Il n'est pas non plus adapté au milieu urbain dense.



Concernant l'éolien urbain, on distingue actuellement deux types de technologies

### ■ L'éolien urbain classique

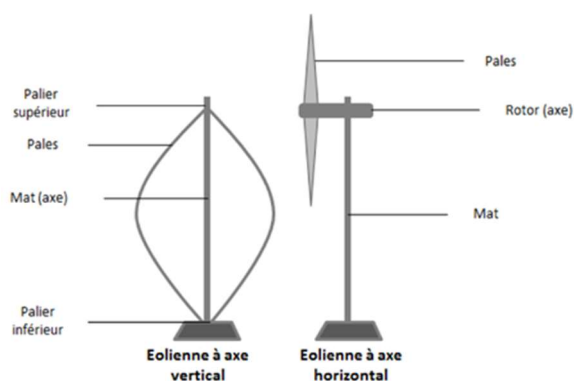
Les éoliennes urbaines sont de tailles et de puissance bien plus petites que les éoliennes traditionnelles afin de s'adapter au milieu urbain. Des technologies variées existent, à axe horizontal ou axe vertical, avec des intégrations sur le bâti ou au sol montées sur des mas de l'ordre de la dizaine de mètres, mais la plupart restent peu rentables et rarement mises en œuvre.

Selon l'Ademe, l'investissement varie de 10k€/kW pour les petites installations à 4k€/kW pour des machines de plus de 10kW.

Sa production varie fortement en fonction de son environnement et des bâtiments alentours et reste incertaine puisque le vent y est très turbulent. Il n'est pas rare d'observer des projets d'éolien urbain totalement inerte à cause d'un choix d'emplacement peu judicieux. Il est donc nécessaire d'effectuer des études de faisabilité spécifiques comprenant des simulations numériques d'écoulement d'air préalable afin d'évaluer la pertinence de son déploiement.

Ce genre d'installation peut provoquer certaines nuisances qui peuvent engendrer une gêne à leur voisinage immédiat et qui doivent être appréhendées en amont. Les éléments à prendre en considération sont le bruit et vibrations, l'impact visuel de l'installation et les ombres portées.

Ce type de projet peut aussi avoir un léger impact sur la biodiversité locale telles que les chauves-souris ou les oiseaux et il convient de l'étudier avant la mise en place du projet.



### ■ L'éolien urbain type Wind my Roof

La technologie de Wind My Roof est la WindBox. C'est un module compact constitué d'une turbine éolienne horizontale et de deux panneaux solaires sur son toit. On l'installe en toiture au niveau de l'acrotère afin de bénéficier de l'écoulement accéléré du vent contre les bâtiments et d'une bonne exposition au soleil.

Comme toute installation d'éolien urbain, la production varie fortement en fonction de son environnement et des bâtiments alentours et reste incertaine. Il est donc nécessaire d'effectuer des études de faisabilité comprenant des simulations numériques d'écoulement d'air préalable afin d'évaluer la pertinence de son déploiement. Wind My Roof produit et facture ce type d'étude pour 6000€.

Selon Wind My roof, la WindBox est fabriquée à 92% en France et bénéficie donc d'une empreinte carbone limitée.

Les prérequis pour une utilisation pertinente de cette solution sont :

- Bonnes conditions venteuses et d'ensoleillement
- Bâtiment avec une hauteur minimale de 10m
- Toiture plate
- Façades orientées aux vents dominants et dégagées
- Densité urbaine du site modérée

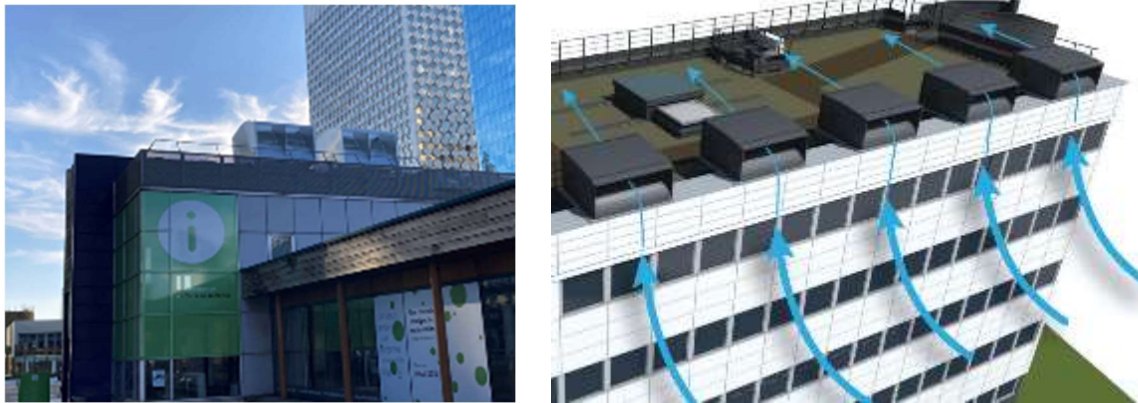


FIGURE 7 : SYSTEME WIND MY ROOF

### 2.1.6 L'énergie micro hydraulique






La technologie consiste en une turbine installée au fil d'un torrent ou à l'intérieur de conduites d'eau suffisamment larges. L'énergie mécanique de l'eau est transformée en électricité.

L'intérêt du déploiement de cette technologie dépend de la géographie du site. Il faut que le cours d'eau ou les conduites utilisées aient un débit suffisant ( $> 3\text{m}^3/\text{s}$ ) et la présence de relief est un plus pour pouvoir exploiter l'énergie potentielle qui provient de la différence de hauteur.



Des turbines de très faibles puissances, appelées pico-turbines, existent également et s'installent sur des conduites de petits diamètres. Seulement l'électricité générée est négligeable et permet principalement d'alimenter des capteurs ou des petits appareils à proximité.

## 2.2 Synthèse des ENR retenues

Le tableau suivant présente l'inventaire des différentes EnR envisageables sur le Palais de Tokyo. La pertinence de chacune des énergies a été évaluée en fonction des ressources disponibles, des besoins et des contraintes du bâtiment (intégration architecturale, opportunité liée aux travaux, etc.). Les solutions identifiées comme pertinentes font l'objet d'une étude de faisabilité approfondie détaillée au §3.

ENR	Atouts	Contraintes	Méthodologie de mise en œuvre	Pertinence de la solution
<b>PAC Air/eau</b>	<p>Faible consommation d'énergie</p> <p>Production de chaleur et de froid</p>	<p>Contrainte d'espace pour installer les PAC et risque au regard des contraintes patrimoniales (taille des modules intérieurs et extérieurs, pièges à sons pour les modules extérieurs, etc.)</p> <p>Traitement acoustique complexe selon puissance de l'installation</p> <p>Distribution en eau glacée à créer pour alimenter les émetteurs (actuellement en détente directe)</p>	<p>Unité extérieure à installer en cours anglaise ou en terrasse</p> <p>Création d'une distribution eau glacée</p>	
<b>Géothermie sur nappe</b>	<p>Production de chaleur et de froid</p> <p>Excellent rendement des PAC</p>	<p>Investissements importants liés au forage</p> <p>Chaleur produite à basse température (45°C) par les pompes à chaleur : peu compatible avec des systèmes terminaux existants, pertinent si les bâtiments sont rénovés</p> <p>Site déjà raccordé au CPCU pour la production de chauffage</p>	<p>Nécessité de forer et de créer un local technique pour les échangeurs et les PAC</p> <p>Forage à 80 m de profondeur environ (a minima 2 forages)</p>	
<b>Géothermie sur champ de sondes ou fondation</b>	<p>Production de chaleur et de froid</p> <p>Excellent rendement des PAC</p>	<p>Non pertinent pour une zone constituée de bâtiments existants, avec rénovations lourdes mais peu de constructions nouvelles.</p> <p>Besoin d'espacement important pour installer les sondes – site urbain dense contraint pour l'emprise du champ de sonde</p>	<p>Nécessité de forer et de créer un local technique pour les échangeurs et les PAC</p>	
<b>Bois énergie</b>	<p>Production de chaleur et ECS</p>	<p>Espace à prévoir pour le stockage du bois et desserte à prévoir côté rue pour l'approvisionnement en biomasse</p> <p>Site déjà raccordé au CPCU pour la production de chauffage – solution peu adaptée pour des besoins d'ECS uniquement</p>	<p>Local technique à créer et silo de stockage à positionner côté rue</p>	
<b>Récupération de chaleur sur eaux usées avec système de production</b>	<p>Réduction de la consommation ECS</p>	<p>Système complexe et investissement onéreux</p>	<p>Installation en local technique d'une pompe à chaleur, d'un échangeur et d'une cuve pour stocker les eaux usées</p>	

<b>Récupération de chaleur sur eaux usées passive</b>	Réduction de la consommation ECS Faible coût d'investissement	Nécessité de centraliser la sortie des eaux usées pour maximiser le potentiel de récupération Echangeur à positionner à proximité du local de production ECS pour limiter les pertes thermiques le long du réseau	Installation d'un échangeur sur l'évacuation des eaux usées	✓
<b>Solaire Thermique</b>	Production locale et autoconsommée d'ECS Adaptée aux besoins importants et constants dans l'année du restaurant	Pour des toitures existantes, les surfaces mobilisables en toiture peuvent être fortement pénalisées par les équipements déjà présents et limiter le productible Problématiques de capacité portante des toitures à surveiller Risque sur l'intégration architecturale des panneaux	Pose des panneaux en toiture	✓
<b>Solaire Hybride</b>	Production d'électricité et d'eau chaude sanitaire	Investissement important, nombre de fabricants restreint. Technologie nouvelle	Pose des panneaux en toiture	✗
<b>Solaire photovoltaïque</b>	Production d'électricité pour l'autoconsommation ou la revente Garantie de production des panneaux sur 15 à 20 ans	Pour des toitures existantes, les surfaces mobilisables en toiture peuvent être fortement pénalisées par les équipements déjà présents et limiter le productible Problématiques de capacité portante des toitures ou d'étanchéité à surveiller Risque sur l'intégration architecturale des panneaux	Pose des panneaux en toiture	✓
<b>ECS Thermodynamique</b>	Economie d'énergie pour la production d'ECS	Idéalement produire l'eau en journée où l'air est plus chaud Contraintes acoustiques selon la puissance de l'installation	Installation du ballon thermodynamique dans un local technique	✓
<b>Grand et moyen éolien</b>	Production d'électricité en autoconsommation	Zone très urbanisée non favorable		✗

<p><b>Micro éolien</b></p>	<p>Production d'électricité en autoconsommation</p> <p>Micro-éoliennes ou éoliennes urbaines de petites dimensions et à faible nuisance sonore</p>	<p>Production très limitée pour les micro-éoliennes pour un investissement conséquent</p> <p>Risques sur l'intégration architecturale – modules à positionner en visibilité au niveau de l'acrotère pour capter l'écoulement le long des façades</p> <p>Nécessité de mener des études aérauliques détaillées pour valider le potentiel : en milieu urbain dense, les bâtiments existants peuvent être des obstacles à l'écoulement du vent et ainsi limiter sa puissance et générer des turbulences.</p>	<p>Modules Wind my Roof à mettre en place sur l'acrotère de la toiture du bâtiment.</p> <p>Eoliennes du type Darrieus/Savonius à installer en toiture.</p> <div data-bbox="1971 351 2038 414"></div>
<p><b>Energie hydraulique</b></p>	<p>Production d'électricité renouvelable</p>	<p>Autorisations administratives et contraintes réglementaires (loi sur l'eau, normes environnementales)</p> <p>Investissements importants</p>	<div data-bbox="1971 654 2038 718"></div>



### 3 ETUDE DU POTENTIEL ENERGETIQUE

La faisabilité technico-économique des solutions ENR identifiées comme pertinentes pour le Palais de Tokyo est détaillée dans le présent chapitre.

#### 3.1 Périmètre des investissements

Les chiffrages présentés ci-après sont des chiffrages TCE, incluant l'ensemble des sujétions GO, CEA, CFO-CFA, PLB et CVC, ainsi que le poste Installation de chantier. Les prix sont actualisés en date de mai 2023. Les prix intègrent également une provision de sécurité liée à la phase amont à laquelle est réalisée l'estimation budgétaire.

#### 3.2 Hypothèses techniques et économiques

Les hypothèses techniques de l'étude sont les suivantes :

- Emissions carbone de l'électricité : 0,052 kgCO<sub>2</sub>/kWh
- Emissions carbone du réseau de chaleur urbain CPCU : 0,172 kgCO<sub>2</sub>/kWh

Les hypothèses économiques de l'étude sont les suivantes :

- Coût de l'électricité (moyenne des factures de l'année 2022) : 140 €HTVA/MWh
- Coût du réseau de chaleur CPCU (moyenne des factures de l'année 2022) : 93,1 €HTVA/MWh

#### 3.3 Récupération de chaleur sur eaux usées avec système de production

##### 3.3.1 Dimensionnement technique

L'étude de potentiel de récupération de calories sur eaux grises via un système dynamique de type PAC Facteur 7 est menée selon 3 périmètres pour les consommations ECS du bâtiment :

- **Périmètre n°1 (scénario 1)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS de l'ensemble du Palais de Tokyo
- **Périmètre n°2 (scénario 2)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS du restaurant Bambini uniquement, dont l'installation actuelle de production ECS n'est pas satisfaisante en matière de performance énergétique (surdimensionnement des échangeurs sur le CPCU pour la production de l'ECS l'été)
- **Périmètre n°3 (scénario 3)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS des restaurants Bambini et M. Bleu, qui présentent les consommations ECS les plus élevées du site

Les caractéristiques techniques de chaque installation sont précisées ci-dessous.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Puissance PAC récupération calories sur eaux grises (kWc)</b>	95	40	74
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	208,7	88,1	162,9
<b>Taux de couverture des besoins ECS (%)</b>	78%	78%	78%

Un exemple d'installation de type PAC Facteur 7 est présenté ci-dessous.



### 3.3.2 Caractéristiques financières

Les caractéristiques financières pour les différents scénarios sont détaillées ci-dessous :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	208,7	88,1	162,9
<b>Economies financières (k€HTVA/an)</b>	23,9	7,0	17,5
<b>Investissements<sup>1</sup> (k€ HT)</b>	598,6	298,4	459,0
<b>TRB (sur l'investissement)</b>	25	43	26
<b>TDC</b>	1 077,5	537,1	826,2
<b>TRB (sur TDC)</b>	45	77	47

### 3.3.3 Impact carbone

L'impact carbone en termes d'émission CO2 évitées est précisé pour chacun des scénarios ci-après :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	208,7	88,1	162,9
<b>Economies carbone (TCO2/an)</b>	20,9	15,1	19,3

### 3.3.4 Contraintes

Les contraintes techniques associées aux différents scénarios sont les suivantes :

<sup>1</sup> Pour mémoire, le périmètre des investissements est précisé au § 3.1

### ■ Scénario n°1

Ce scénario implique le passage en production centralisée pour la production d'ECS du Palais de Tokyo. Le bâtiment étant actuellement majoritairement en solution décentralisée par ballons électriques dans les locaux nécessitant de l'ECS, une distribution secondaire depuis le local production ECS centralisée devra être mise en œuvre pour alimenter les différents locaux.

⇒ Travaux de plomberie et second œuvre à prévoir

Par ailleurs, la PAC de récupération des calories sur eaux grises ainsi que les cuves de stockage d'ECS et de stockage d'eaux grises devront être implantées dans le local technique de production centralisée (local technique d'environ 55 m<sup>2</sup>), local à positionner à proximité d'une canalisation d'eaux usées pour pouvoir prélever les calories. A noter que le local technique doit présenter une HSP minimale de 2,2 m pour pouvoir implanter le système de récupération dynamique.

⇒ Impact sur la surface et la position du local technique de production ECS

### ■ Scénario n°2

La récupération de calories sur eaux usées étant uniquement destinée à alimenter le restaurant Bambini, les implications techniques sont limitées à l'ajout de la PAC de récupération de calories sur eaux grises, de la cuve de stockage ECS et de la cuve d'eaux grises dans le local de production ECS (surface nécessaire d'environ 35 m<sup>2</sup>)

⇒ Impact sur la surface et la position du local technique de production ECS

### ■ Scénario n°3

De même que pour le scénario 1, ce scénario implique le passage en production centralisée pour la production d'ECS des restaurants Bambini et M. Bleu. Le restaurant M. Bleu disposant actuellement de sa propre production d'ECS par ballon électrique, une distribution secondaire depuis le local production ECS centralisée devra être mise en œuvre pour alimenter le restaurant M. Bleu.

⇒ Travaux de plomberie et second œuvre à prévoir

De même que pour le scénario n°1, la PAC de récupération des calories sur eaux grises ainsi que les cuves de stockage d'ECS et de stockage d'eaux grises devront être implantées dans le local technique de production centralisée situé à proximité des réseaux EU (local technique d'environ 40 m<sup>2</sup>).

⇒ Impact sur la surface et la position du local technique de production ECS

En première approche, il est proposé de positionner local de production ECS à l'aplomb des réseaux provenant de la cuisine du restaurant Bambini.

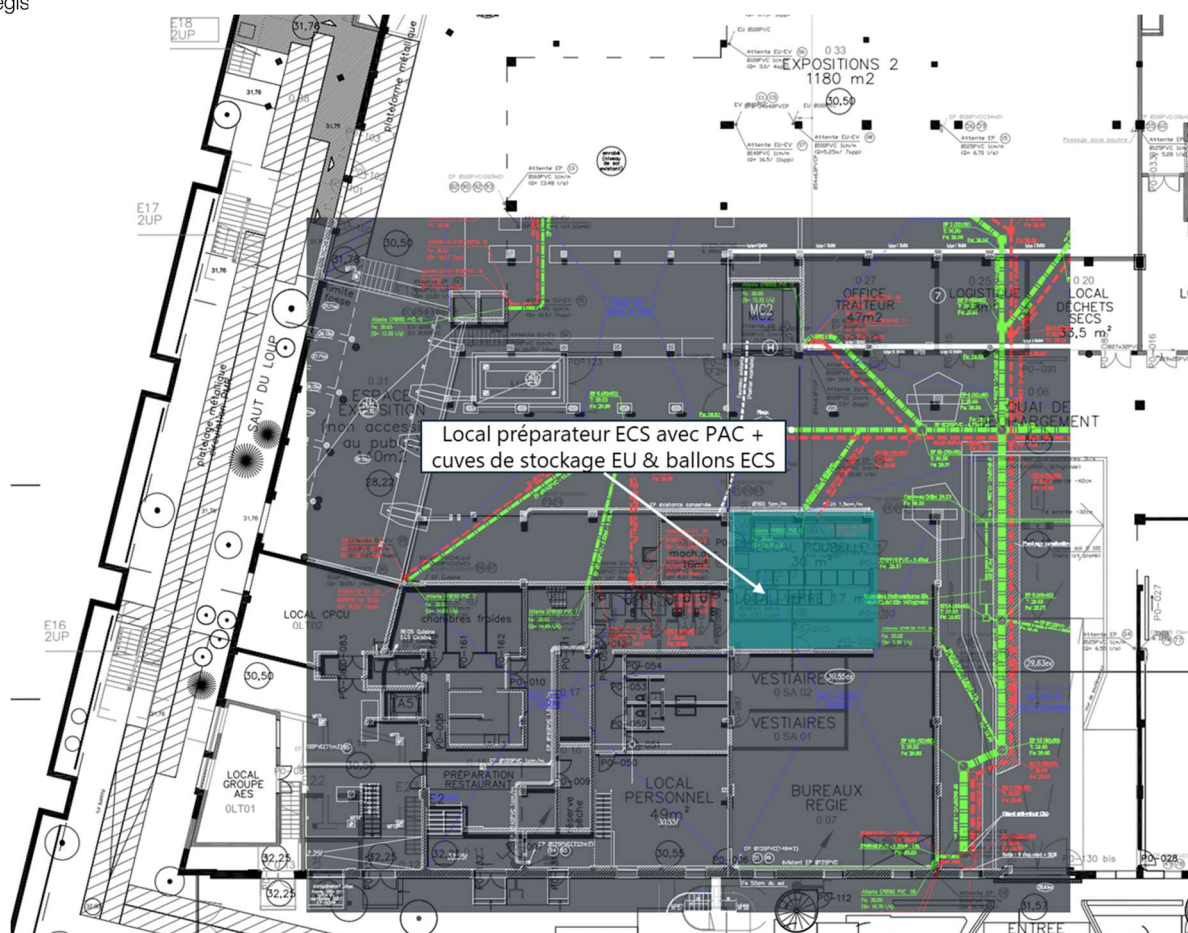


FIGURE 8 : PROPOSITION D'IMPLANTATION DU LOCAL ECS

A noter qu'il faudra prévoir un dévoiement des réseaux EU, afin qu'ils alimentent la cuve de stockage EU du local de production ECS – voir schéma de principe ci-dessous.

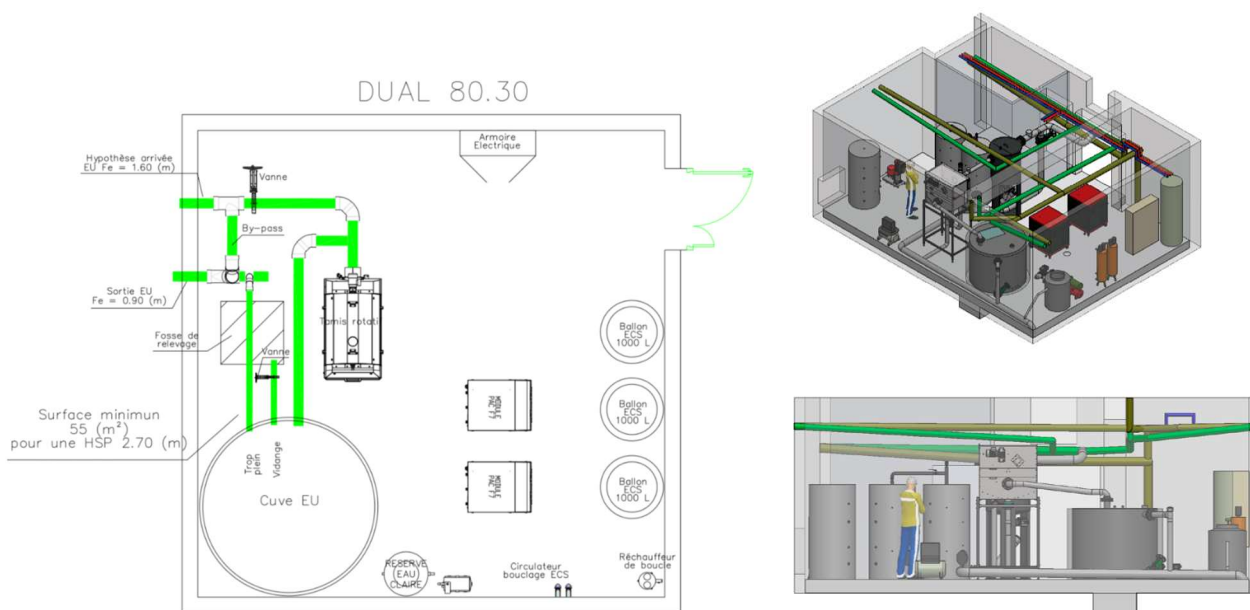


FIGURE 9 : SCHEMA DE PRINCIPE IMPLANTATION SYSTEME PAC FACTEUR 7

### 3.4 Récupération de chaleur sur eaux usées passive

#### 3.4.1 Dimensionnement technique

L'étude de potentiel de récupération de calories sur eaux grises via un échangeur statique est menée selon 3 périmètres pour les consommations ECS du bâtiment :

- **Périmètre n°1 (scénario 1)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS de l'ensemble du Palais de Tokyo
- **Périmètre n°2 (scénario 2)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS du restaurant Bambini uniquement, dont l'installation actuelle de production ECS n'est pas satisfaisante en matière de performance énergétique (surdimensionnement des échangeurs sur le CPCU pour la production de l'ECS l'été)
- **Périmètre n°3 (scénario 3)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS des restaurants Bambini et M. Bleu, qui présentent les consommations ECS les plus élevées du site

L'étude est conduite avec l'échangeur statique de type Obox C.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	80,5	33,9	62,8
<b>Taux de couverture des besoins ECS (%)</b>	30%	30%	30%
<b>Dimensions de l'échangeur statique</b>	0,5 x 1,1 x 0,8 m	0,5 x 1,1 x 0,8 m	0,5 x 1,1 x 0,8 m

**NB** : Le rendement de l'échangeur statique Obox C est une donnée communiquée par le fournisseur pour le cas d'un fonctionnement optimal de l'échangeur.

Le schéma ci-dessous présente le principe de fonctionnement d'un échangeur statique de récupération de calories sur eaux grises.

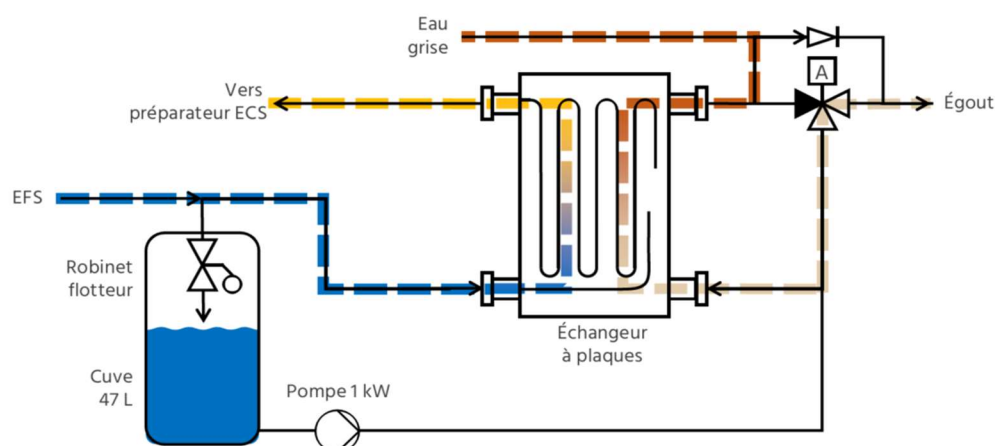


FIGURE 10 : SCHEMA DE PRINCIPE ECHANGEUR OBOX C



### 3.4.2 Caractéristiques financières

Les caractéristiques financières pour les différents scénarios sont détaillées ci-dessous :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	80,5	33,9	62,8
<b>Economies financières (k€HTVA/an)</b>	9,4	3,2	7,2
<b>Investissements<sup>2</sup> (k€ HT)</b>	319,8	129,6	208,1
<b>TRB (sur investissement)</b>	34	41	29
<b>TDC</b>	575,6	233,3	374,6
<b>TRB (Sur TDC)</b>	61	73	52

### 3.4.3 Impact carbone

L'impact carbone en termes d'émission CO2 évitées est précisé pour chacun des scénarios ci-après :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	80,5	33,9	62,8
<b>Economies carbone (TCO2/an)</b>	6,5	5,8	7,3

### 3.4.4 Contraintes

Les contraintes techniques associées aux différents scénarios sont les suivantes :

#### ■ Scénario n°1

Ce scénario implique le passage en production centralisée pour la production d'ECS du Palais de Tokyo. Le bâtiment étant actuellement majoritairement en solution décentralisée par ballons électriques dans les locaux nécessitant de l'ECS, une distribution secondaire depuis le local production centralisée devra être mise en œuvre pour alimenter les différents locaux.

⇒ Travaux de plomberie et second œuvre à prévoir

Par ailleurs, l'échangeur statique doit être positionné au niveau d'une évacuation des eaux grises centralisée, afin de maximiser la récupération de calories sur eaux usées (échangeur de dimensions 0,5 x 1,1 x 0,8 m pour l'échangeur Obox C) et le local de production d'ECS doit être positionné au plus près de l'échangeur, de façon à minimiser les pertes thermiques entre l'échangeur et le préparateur ECS.

⇒ Impact sur la position du local technique de production ECS

<sup>2</sup> Pour mémoire, le périmètre des investissements est précisé au § 3.1

## ■ Scénario n°2

La récupération de calories sur eaux usées étant uniquement destinée à alimenter le restaurant Bambini, les implications techniques sont limitées au raccordement de l'échangeur statique sur le réseau eaux usées, et à l'implantation du local de production ECS, à positionner au plus près de l'échangeur statique.

- ⇒ Impact sur la position du local technique de production ECS

### ■ Scénario n°3

Ce scénario implique le passage en production centralisée pour la production d'ECS des restaurants Bambini et M. Bleu. Le restaurant M. Bleu disposant actuellement de sa propre production d'ECS par ballon électrique, une distribution secondaire depuis le local production centralisée devra être mise en œuvre pour alimenter le restaurant M. Bleu.

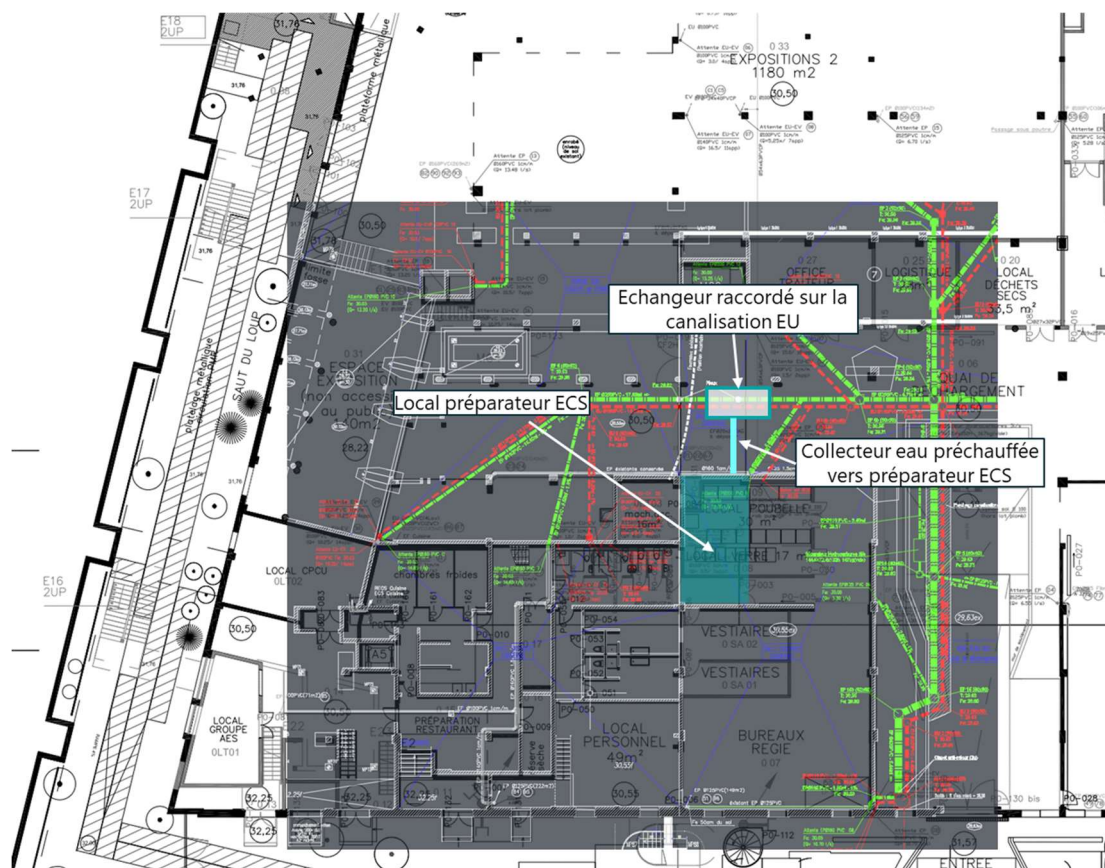
- ⇒ Travaux de plomberie et second œuvre à prévoir

De même que pour le scénario n°1, l'échangeur statique doit être positionné au niveau d'une évacuation des eaux grises centralisée et le local de production d'ECS doit être positionné au plus près de l'échangeur.

- ⇒ Impact sur la position du local technique de production ECS

En première approche, il est proposé de positionner local de production ECS à l'aplomb des réseaux provenant de la cuisine du restaurant Bambini. L'échangeur devant être raccordé directement sur le réseau d'eaux usées (voir principe de raccordement ci-après), il est proposé l'implantation suivante :

- Implantation du local préparateur ECS au droit du local poubelle
- Raccordement de l'échangeur statique sur la canalisation d'EU provenant du restaurant Bambini



**FIGURE 11 : PROPOSITION D'IMPLANTATION DE L'ECHANGEUR STATIQUE ET DU LOCAL ECS**

Le principe de raccordement d'un échangeur statique sur eaux grises est précisé sur le schéma ci-dessous (échangeur de type Obox C).

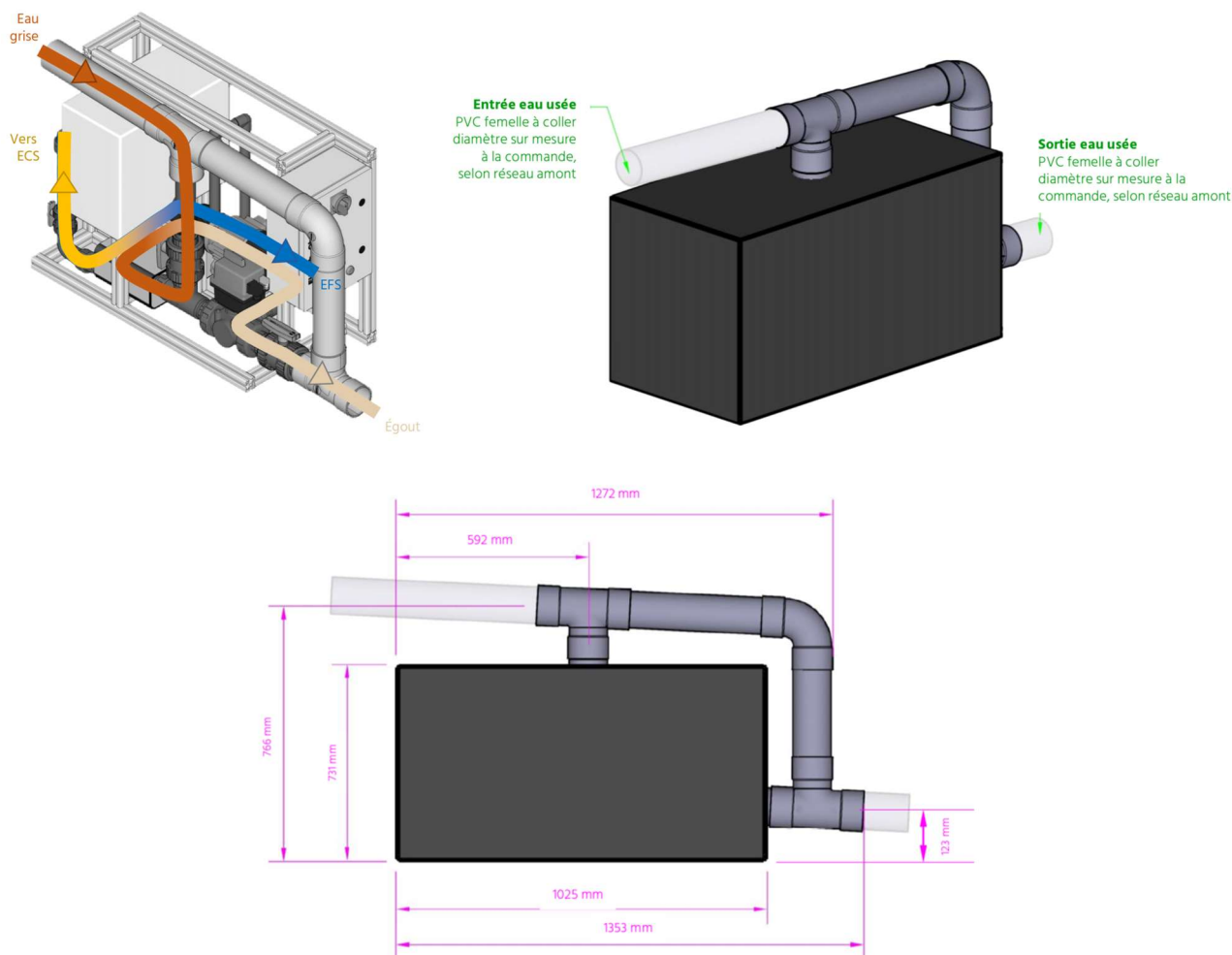


FIGURE 12 : PRINCIPE DE RACCORDEMENT ECHANGEUR OBOX C

### 3.5 ECS thermodynamique

#### 3.5.1 Dimensionnement technique

L'étude de potentiel pour une production ECS thermodynamique est menée selon 3 périmètres pour les consommations ECS du bâtiment :

- **Périmètre n°1 (scénario 1)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS de l'ensemble du Palais de Tokyo
- **Périmètre n°2 (scénario 2)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS du restaurant Bambini uniquement, dont l'installation actuelle de production ECS n'est pas satisfaisante en matière de performance énergétique (surdimensionnement des échangeurs sur le CPCU pour la production de l'ECS l'été)
- **Périmètre n°3 (scénario 3)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS des restaurants Bambini et M. Bleu, qui présentent les consommations ECS les plus élevées du site

Les caractéristiques techniques de chaque installation sont précisées ci-dessous.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Puissance ECS thermodynamique (kWc)</b>	95	30	50
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	161,0	67,9	125,7
<b>Taux de couverture des besoins ECS (%)</b>	60%	60%	60%

### 3.5.2 Caractéristiques financières

Les caractéristiques financières pour les différents scénarios sont détaillées ci-dessous :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	161,0	67,9	125,7
<b>Economies financières (k€HTVA/an)</b>	17,2	4,2	12,3
<b>Investissements<sup>3</sup> (k€ HT)</b>	365,3	181,3	274,1
<b>TRB (sur investissement)</b>	21	43	22
<b>TDC</b>	657,5	326,3	493,4
<b>TRB (sur TDC)</b>	38	78	40

### 3.5.3 Impact carbone

L'impact carbone en termes d'émission CO2 évitées est précisé pour chacun des scénarios ci-après :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	161,0	67,9	125,7
<b>Economies carbone (TCO2/an)</b>	15,5	11,7	15,1

<sup>3</sup> Pour mémoire, le périmètre des investissements est précisé au § 3.1

### 3.5.4 Contraintes

Les contraintes techniques associées aux différents scénarios sont les suivantes :

#### ■ Scénario n°1

Ce scénario implique le passage en production centralisée pour la production d'ECS du Palais de Tokyo. Le bâtiment étant actuellement majoritairement en solution décentralisée par ballons électriques dans les locaux nécessitant de l'ECS, une distribution secondaire depuis le local production centralisée devra être mise en œuvre pour alimenter les différents locaux.

⇒ Travaux de plomberie et second œuvre à prévoir

Par ailleurs, ce scénario implique l'intégration du ballon ECS thermodynamique en local technique, local à positionner de façon à avoir un accès en façade (volume minimal : 20 m3)

⇒ Impact sur la surface et la position du local technique de production ECS

#### ■ Scénario n°2

La production ECS thermodynamique étant uniquement destinée à alimenter le restaurant Bambini, les implications techniques sont limitées à l'ajout ballon ECS thermodynamique en local technique (volume minimal : 20 m3).

⇒ Impact sur la surface et la position du local technique de production ECS

#### ■ Scénario n°3

Ce scénario implique le passage en production centralisée pour la production d'ECS des restaurants Bambini et M. Bleu. Le restaurant M. Bleu disposant actuellement de sa propre production d'ECS par ballon électrique, une distribution secondaire depuis le local production centralisée devra être mise en œuvre pour alimenter le restaurant M. Bleu.

⇒ Travaux de plomberie et second œuvre à prévoir

De même que pour le scénario n°1, ballon ECS thermodynamique doit être intégré en local technique (volume minimal : 20 m3).

⇒ Impact sur la surface et la position du local technique de production ECS

En première approche, il est proposé de positionner le local technique pour le ballon ECS thermodynamique à proximité du local CPCU au niveau N0 – voir repérage ci-dessous.



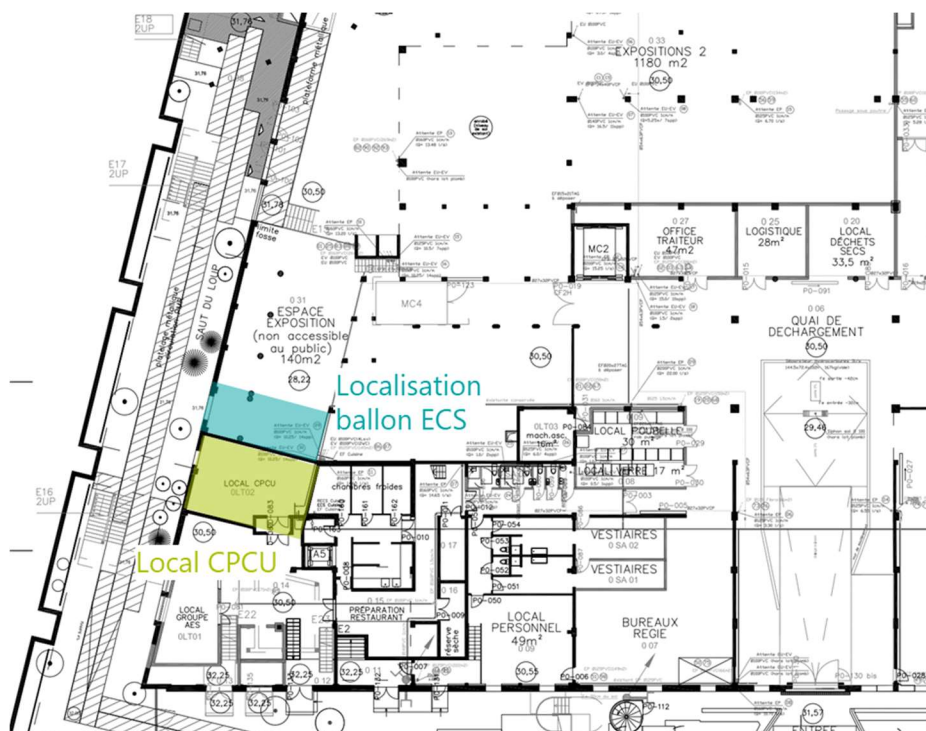


FIGURE 13 : POSITION DU LOCAL TECHNIQUE ECS THERMODYNAMIQUE

## 3.6 Solaire thermique

### 3.6.1 Dimensionnement technique

L'étude de potentiel solaire thermique est menée selon 3 périmètres pour les consommations ECS du bâtiment :

- **Périmètre n°1 (scénario 1)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS de l'ensemble du Palais de Tokyo
- **Périmètre n°2 (scénario 2)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS du restaurant Bambini uniquement, dont l'installation actuelle de production ECS n'est pas satisfaisante en matière de performance énergétique (surdimensionnement des échangeurs sur le CPCU pour la production de l'ECS l'été)
- **Périmètre n°3 (scénario 3)** : installation dimensionnée pour répondre aux besoins ECS des restaurants Bambini et M. Bleu, qui présentent les consommations ECS les plus élevées du site

Les caractéristiques techniques de l'installation solaire thermique pour les différents scénarios sont détaillées ci-dessous :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Localisation implantation capteurs solaires</b>	Toiture-terrasse péristyle uniquement	Toiture-terrasse péristyle uniquement	Toiture-terrasse péristyle uniquement
<b>Surface capteurs solaires thermiques (m²)</b>	172	81,2	140
<b>Nombre capteurs solaires thermiques</b>	74	35	60

<b>Productivité annuelle (kWh/m<sup>2</sup>.an)</b>	589	565	581
<b>Production solaire annuelle (MWh/an)</b>	101,2	45,9	80,9
<b>Taux de couverture des besoins ECS (%)</b>	41,6%	44,7%	42,6%
<b>Durée de vie des équipements</b>	Panneaux solaires thermiques : 15 ans		

### 3.6.2 Caractéristiques financières

Les caractéristiques financières de l'installation solaire thermique pour les différents scénarios sont détaillées ci-dessous :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	101,2	45,9	80,9
<b>Economies financières (k€HTVA/an)</b>	12,0	4,3	9,2
<b>Investissements<sup>4</sup> (k€ HT)</b>	444,0	219,6	326,3
<b>TRB (sur investissement)</b>	37	51	36
<b>Coût d'entretien annuel (€ HT/an)</b>	11 101	5 490	8 158
<b>TDC</b>	799,2	395,3	587,3
<b>TRB (sur TDC)</b>	67	92	64

#### Analyse

On constate que le TRB est supérieur à la durée de vie de l'équipement (15 ans). La solution panneaux solaires thermiques n'est donc pas pertinente sur le projet.

Par ailleurs les coûts d'entretien sont importants au regard des économies réalisées. La rentabilité des solutions est d'autant plus diminuée.

<sup>4</sup> Pour mémoire, le périmètre des investissements est précisé au § 3.1

### 3.6.3 Impact carbone

L'impact carbone en termes d'émission CO2 évitées est précisé pour chacun des scénarios ci-après :

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	101,2	45,9	80,9
<b>Economies carbone (TCO2/an)</b>	10,8	7,9	9,7

### 3.6.4 Contraintes

Les contraintes techniques associées aux différents scénarios sont les suivantes :

#### ■ Scénario n°1

Ce scénario implique le passage en production centralisée pour la production d'ECS du Palais de Tokyo. Le bâtiment étant actuellement majoritairement en solution décentralisée par ballons électriques dans les locaux nécessitant de l'ECS, une distribution secondaire depuis le local production centralisée devra être mise en œuvre pour alimenter les différents locaux.

⇒ Travaux de plomberie et second œuvre à prévoir

Par ailleurs, un (ou plusieurs) ballon(s) de stockage solaire devront être installés dans le local technique de production centralisée.

⇒ Impact sur la surface du local technique

#### ■ Scénario n°2

La production solaire thermique étant uniquement destinée à alimenter le restaurant Bambini, les implications techniques sont limitées à l'ajout d'un ballon de stockage solaire dans le local de production ECS

#### ■ Scénario n°3

Ce scénario implique le passage en production centralisée pour la production d'ECS des restaurants Bambini et M. Bleu. Le restaurant M. Bleu disposant actuellement de sa propre production d'ECS par ballon électrique, une distribution secondaire depuis le local production centralisée devra être mise en œuvre pour alimenter le restaurant M. Bleu.

⇒ Travaux de plomberie et second œuvre à prévoir

Par ailleurs, un (ou plusieurs) ballon(s) de stockage solaire devront être installés dans le local technique de production centralisée.

⇒ Impact sur la surface du local technique

#### ■ Scénarii n°1, 2 et 3

Pour les 3 scénarii, la compatibilité d'un point de vue Urbanisme de l'installation des panneaux solaires thermiques en toiture du Palais de Tokyo devra être vérifiée auprès de l'Architecte des Bâtiments de France de l'arrondissement.

## 3.7 Solaire photovoltaïque

### 3.7.1 Dimensionnement technique

L'étude de potentiel photovoltaïque est menée sur deux scénarios, afin de tenir compte des contraintes techniques que représente la toiture en couverture zinc.

	Scénario 1	Scénario 2
Scénario consommations	Etat existant	Etat existant
Périmètre d'implantation des panneaux photovoltaïques	Ensemble de la toiture du Palais de Tokyo : couverture zinc + toiture-terrasse péristyle	Toiture-terrasse péristyle uniquement

Les caractéristiques techniques de l'installation photovoltaïque pour les différents scénarios sont détaillées ci-dessous :

	Scénario 1	Scénario 2
Surface panneaux photovoltaïques (m <sup>2</sup> )	1 782 m <sup>2</sup>	460 m <sup>2</sup>
Puissance installée centrale photovoltaïques (kWc)	275	71
Production annuelle centrale photovoltaïque (MWh/an)	314,4	74,9
Taux d'autoconsommation (%)	98%	100%
Taux d'autoproduction (%)	11,2%	2,7%
Durée de vie des équipements	Panneaux photovoltaïques : 20 ans Onduleurs : 10 ans	

### 3.7.2 Caractéristiques financières

Les caractéristiques financières de l'installation photovoltaïque pour les différents scénarios sont détaillées ci-dessous :

Scénario 1	Scénario 2
------------	------------

<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	309,0	74,9
<b>Economies financières (k€HTVA/an)</b>	43,2	10,5
<b>Coût d'entretien annuel (€ HT/an)</b>	6 072	1 568
<b>Investissements (k€ HT)</b>	303,6	78,4
<b>TRB (sur investissement)</b>	8,2	8,8
<b>TDC</b>	546,5	141,1
<b>TRB (sur TDC)</b>	14,7	15,8

### 3.7.3 Impact carbone

L'impact carbone en termes d'émission CO2 évitées est précisé pour chacun des scénarios ci-après :

	Scénario 1	Scénario 3
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	309,0	74,8
<b>Economies carbone (TCO2/an)</b>	16,1	3,9

### 3.7.4 Contraintes

Plusieurs modes de pose sont envisageables pour les panneaux photovoltaïques selon la partie de toiture considérée.

#### ■ Partie en couverture zinc

Pour cette partie de la toiture, deux modes de pose sont envisageables :

- Fixation sur rails
- Pose par clips sur panneaux zinc à joint debout

	Fixation sur rails rapportés	Clips sur panneaux zinc à joint debout
<b>Principe</b>	Panneaux vissés sur rail porteur horizontal monté sur pinces de fixation vissées sur le joint	Pose des panneaux sur des pattes de fixation vissées sur les joints debout
<b>Avantages</b>	Pas de contrainte sur la dimension des panneaux de couverture zinc	Système visuellement intégré au toit Poids du complexe limité

	Système adapté à tout type de couverture	
<b>Inconvénients</b>	Surcharge plus importante induite par les rails de support des panneaux	Nécessité de déposer les panneaux de couverture actuel pour installer des panneaux à joint debout compatibles avec le système de clips Contrainte sur l'entraxe des panneaux de couverture
<b>Surcharge induite par le complexe</b>	15 kg/m <sup>2</sup>	12 kg/m <sup>2</sup>
<b>Illustration</b>		

- ⇒ La faisabilité structurelle devra être vérifiée concernant la capacité de la charpente à supporter le poids de l'installation photovoltaïque
- ⇒ Par ailleurs, la compatibilité d'un point de vue Urbanisme de l'installation des panneaux photovoltaïques sur la couverture zinc doit être vérifiée auprès de l'Architecte des Bâtiments de France de l'arrondissement.

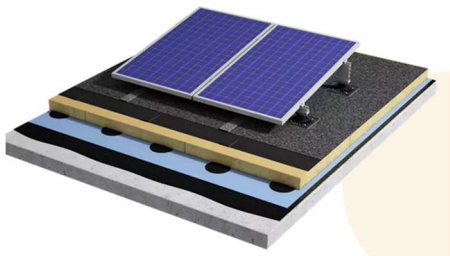

#### ■ Toiture terrasse péristyle

Pour cette partie de la toiture, deux modes de pose sont envisageables :

- Thermo-soudage
- Pose sur ossature rapportée

	Thermo-soudage sur étanchéité	Pose sur ossature rapportée
<b>Principe</b>	Fixation des panneaux PV sur un système de plots thermo-soudés au revêtement d'étanchéité	Création d'une structure métallique dédiée en surélévation, appuyée sur les éléments porteurs du bâtiment par l'intermédiaire de plots béton
<b>Avantages</b>	Absence de percement de l'étanchéité	Reprise ponctuelle de l'étanchéité au droit des plots d'appui



	Poids du complexe limité	
<b>Inconvénients</b>	Nécessité de prévoir une reprise de l'étanchéité et de poser une étanchéité compatible avec une pose par thermo soudage des panneaux PV	Poids du complexe plus élevé Percement de l'étanchéité au droit des plots béton
<b>Illustration</b>		

### 3.7.5 Verrière photovoltaïque

En complément est étudiée l'option d'une verrière photovoltaïque.

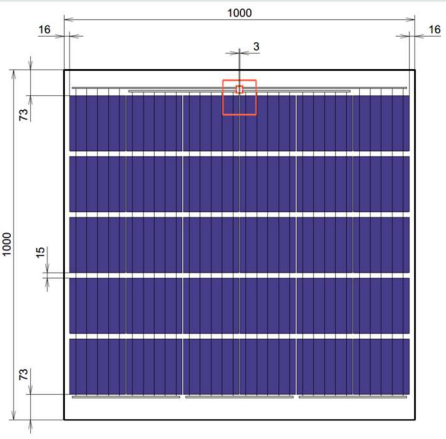
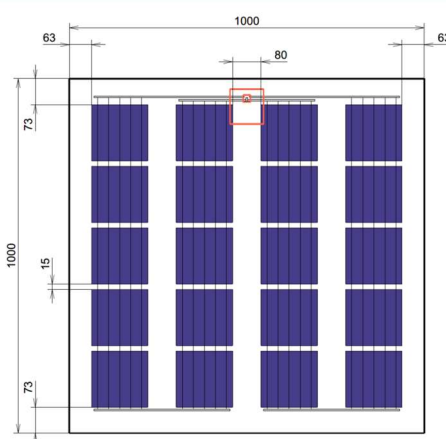
#### ■ Productible photovoltaïque

Les caractéristiques techniques de l'étude sont les suivantes :

Verrière photovoltaïque	
<b>Scénario consommations</b>	Etat existant
<b>Inclinaison/orientation</b>	14° Orientations Sud, Est, Ouest et Nord
<b>Périmètre d'installation</b>	Ensemble des verrières du Palais de Tokyo

En première approche, deux options de densité de cellules photovoltaïques sont étudiées. Les caractéristiques des variantes sont précisées ci-dessous.

	Option 1	Option 2
<b>Dimensions cellules PV</b>	15 cm x 15 cm	15 cm x 15 cm
<b>Caractéristiques physiques vitrage</b>	Front glass : Clearvision 6 mm Back glass : ClearLite : 6 mm	Front glass : Clearvision 6 mm Back glass : ClearLite : 6 mm
<b>Epaisseur complexe</b>	14 mm	14 mm
<b>Densité cellules PV</b>	76%	50%

<b>Transparence vitrage photovoltaïque</b>	24%	50%
<b>Puissance vitrage PV</b>	153 Wc/m <sup>2</sup>	102 Wc/m <sup>2</sup>
<b>Rendu vitrage PV</b>		

Les résultats sont précisés ci-dessous.

	Option 1	Option 2
<b>Surface vitrages photovoltaïques (m<sup>2</sup>)</b>	1 834 m <sup>2</sup>	1 834 m <sup>2</sup>
<b>Transparence verrière PV</b>	24%	50%
<b>Puissance installée centrale photovoltaïque (kWc)</b>	280,5 kWc	187 kWc
<b>Production annuelle verrière photovoltaïque (MWh/an)</b>	282,2	188,2
<b>Taux d'autoconsommation (%)</b>	99%	100%
<b>Taux d'autoproduction (%)</b>	10%	7%
<b>Economie d'énergie (MWh/an)</b>	280,2	188,2
<b>Economie financière (k€HT/an)</b>	39	26
<b>Economie carbone (TCO2/an)</b>	14,6	9,8
<b>Plus-value d'investissement (k€ HT)</b>	663	650

<b>TRB (sur investissement)</b>	17	25
<b>TDC</b>	1 193	1 170
<b>TRB (sur TDC)</b>	30,6	45

■ **NB** : la présente étude est une étude de faisabilité du potentiel de production photovoltaïque. Il ne s'agit pas d'une étude de conception de la verrière photovoltaïque – ne sont notamment pas vérifiées les problématiques de performance thermique de vitrage, de confort visuel et confort thermique résultant sous la verrière, ni d'implantation des vitrages photovoltaïques par rapport aux trames existantes.

### ■ Contraintes de mise en œuvre

Plusieurs points d'attention doivent être pris en compte pour le déploiement d'une verrière photovoltaïque :

- Optimum densité de cellules photovoltaïques – quantité de lumière transmise et gestion des apports solaires : les enjeux de confort visuel et confort thermique pour les locaux sous la verrière impacteront la densité de cellules photovoltaïques installables en vitrage et donc le productible résultant
- Le vitrage photovoltaïque étant du bi-verre, des études complémentaires devront être conduites sur la montée en température des cellules PV, particulièrement si du double vitrage est prévu en verrière
- Le principe de verrière photovoltaïque devra être validé par les pompiers (vérification du potentiel calorifique de l'ensemble et prévention des incendies)
- Il faudra également veiller à l'intégration architecturale des câbles électriques circulant en toiture à l'air libre
- Surcharge apportée sur la structure : L'intégration des cellules photovoltaïques dans le complexe de vitrage nécessite la mise en œuvre d'une épaisseur de verre supplémentaire. Ainsi le poids des vitrages photovoltaïques est environ deux fois plus lourd qu'un double vitrage usuel. Cette surcharge présente un risque quant à la faisabilité de cette solution, la charpente ayant déjà été renforcée en 2012 et présentant des capacités limitées selon l'étude menée par AIA en 2020.
- Surface de vitrage et capacité de production : la disposition des cellules photovoltaïques dépend de la géométrie des vitrages. Une provision de perte de surface a été prise en compte dans la surface disponible pour la mise en œuvre des vitrages photovoltaïques. L'ajout d'éventuelles contraintes géométriques complémentaires réduira la capacité de production.

## 4 SYNTHÈSE

L'étude étant conduite sur différents postes de consommation, la synthèse distingue les solutions étudiées par poste de consommation.

### ■ Climatisation

Deux solutions d'ENR sont envisageables pour répondre aux besoins de climatisation du site :

- Production eau glacée par PAC géothermique
- Production eau glacée par PAC air/eau

Au vue des contraintes urbaines et architecturales (taille des équipements, intégration architecturale, contraintes acoustiques), **les solutions PAC géothermiques et PAC air/eau ne sont pas pertinentes sur le site.**

### ■ Electricité

Le bâtiment est peu masqué et présente des surfaces propices au déploiement d'une installation photovoltaïque pour couvrir une partie des besoins en électricité du site en autoconsommation.

Les caractéristiques technico-économiques de l'étude de faisabilité sont rappelées dans le tableau ci-dessous.

	Scénario 1	Scénario 3
<b>Puissance installée centrale photovoltaïques (kWc)</b>	275	71
<b>Taux d'autoconsommation (%)</b>	98%	100%
<b>Taux d'autoproduction (%)</b>	11,2%	2,7%
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	309,0	74,9
<b>Economies financières (k€HTVA/an)</b>	43,2	10,5
<b>Coût d'entretien annuel (€ HT/an)</b>	6 072	1 568
<b>Investissements (k€ HT)</b>	303,6	78,4
<b>TRB (sur investissement)</b>	8,2	8,8
<b>TDC</b>	546,5	141,1
<b>TRB (sur TDC)</b>	14,7	15,8
<b>Durée de vie des équipements</b>	Panneaux photovoltaïques : 20 ans Onduleurs : 10 ans	

Le scénario 1 permet de maximiser le taux d'autoproduction et est le plus intéressant pour réduire les consommations d'électricité réseau et la facture d'électricité du bâtiment. La capacité structurelle de la charpente est limitée. Les éventuels renforts structurels augmenteront le coût lié à cette solution et par conséquent augmenteront également son temps de retour. **Ce scénario implique un déploiement sur la couverture zinc dont la faisabilité structurelle et patrimoniale doit être confirmée.**

Le scénario 2 présente très peu de contraintes en matière de mise en œuvre (déploiement sur la toiture terrasse du péristyle). Sa faisabilité patrimoniale est à confirmer. Par ailleurs l'exploitation de la toiture terrasse du

péristyle pour d'autres usages réduira la surface disponible. Ce scénario est cependant nettement moins intéressant en termes de couverture des consommations d'électricité, **il n'apparaît pas pertinent de les retenir.**

La mise en œuvre de **verrière photovoltaïque** permettrait de réduire les consommations d'électricité, dont les temps de retour sont plus importants que pour les panneaux photovoltaïques. Par ailleurs, les contraintes présentées exerceront une influence sur la conception de l'ouvrage pouvant réduire ses performances énergétiques. Parmi **ces contraintes**, l'optimum densité de cellules photovoltaïques – Quantité de lumières transmise et gestion des apports solaires ainsi que la capacité structurelle de la charpente **présentent des risques importants quant à la faisabilité de la solution.**

## ■ ECS

Le tableau ci-dessous présente une synthèse comparative des différentes solutions envisagées pour la production d'ECS pour chacun des 3 scénarii étudiés.

### ■ Scénario 1 : Production d'ECS de l'ensemble du Musée

Solution ENR	PAC sur eaux usées	Echangeur statique sur eaux usées	ECS thermodynamique	ECS solaire thermique
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	208,7	80,5	161,0	101,2
<b>Taux de couverture des besoins ECS (%)</b>	78%	30%	60%	41,6%
<b>Economies financières (k€HTVA/an)</b>	23,9	9,4	17,2	12,0
<b>Investissements (k€ HT)</b>	598,6	319,8	365,3	444,0
<b>TRB</b>	25	34	21	37
<b>TDC</b>	1 077,5	575,6	657,5	799,2
<b>TRB (sur TDC)</b>	45	61	38	66,6
<b>Economies carbone (TCO2/an)</b>	20,9	6,5	15,5	10,8
<b>Durée de vie théorique des équipements</b>	20 ans	15 ans	20 ans	15 ans

## Analyse

En termes d'économies d'énergie annuelles, la solution la plus intéressante est la solution de récupération de calories sur eaux usées avec un système de production de type PAC. Ceci s'explique par le rendement très élevé de la PAC eau/eau sur eaux usées. L'ECS thermodynamique est également très intéressante avec un taux de couverture d'environ 60% des besoins ECS actuels.

En termes de TRB, la solution **ECS thermodynamique est la plus intéressante**. Elle présente en outre moins de contraintes de mise en œuvre que la solution PAC sur eaux usées. Par ailleurs, elle permet des économies carbone substantielles.

■ **Scénario 2 : Production d'ECS du restaurant Bambini**

Solution ENR	PAC sur eaux usées	Echangeur statique sur eaux usées	ECS thermodynamique	ECS solaire thermique
<b>Economies d'énergie annuelles (MWh/an)</b>	88,1	33,9	67,9	45,9
<b>Taux de couverture des besoins ECS (%)</b>	78%	30%	60%	44,7%
<b>Economies financières (k€HTVA/an)</b>	7,0	3,2	4,2	4,3
<b>Investissements (k€ HT)</b>	298,4	129,6	181,3	219,6
<b>TRB</b>	43	41	43	51
<b>TDC</b>	537,1	233,3	326,3	395,3
<b>TRB (sur TDC)</b>	77	73	78	92
<b>Economies carbone (TCO2/an)</b>	15,1	5,8	11,7	7,9
<b>Durée de vie théorique des équipements</b>	20 ans	15 ans	20 ans	15 ans

**Analyse**

De même que pour le scénario 1, en termes d'économies d'énergie annuelles, les solutions les plus intéressantes sont les solutions PAC sur eaux usées et ECS thermodynamique.

En termes de TRB, **les solutions les plus intéressantes sont les solutions ECS thermodynamique et échangeur statique sur eaux grises**. La solution ECS thermodynamique présente en outre moins de contraintes de mise en œuvre que la solution échangeur statique sur eaux usées. Par ailleurs, elle permet des économies carbone substantielles.



■ Scénario 3 : Production d'ECS des restaurants Bambini et M.Bleu

Solution ENR	PAC sur eaux usées	Echangeur statique sur eaux usées	ECS thermodynamique	ECS solaire thermique
Economies d'énergie annuelles (MWh/an)	162,9	62,8	125,7	80,9
Taux de couverture des besoins ECS (%)	78%	30%	60%	42,6%
Economies financières (k€HTVA/an)	17,5	7,2	12,3	9,2
Investissements (k€ HT)	459,0	208,1	274,1	326,3
TRB	26	29	22	36
TDC	826,2	374,6	493,4	587,3
TRB (sur TDC)	47	52	40	64
Economies carbone (TCO2/an)	19,3	7,3	15,1	9,7
Durée de vie théorique des équipements	20 ans	15 ans	20 ans	15 ans

### Analyse

De même que pour le scénario 1, les solutions les plus intéressantes en termes d'économies d'énergie annuelles, sont les solutions PAC sur eaux usées et ECS thermodynamique. En termes de TRB, c'est **la solution ECS thermodynamique qui est la plus intéressante**. Elle présente en outre moins de contraintes de mise en œuvre que la solution PAC sur eaux usées. Par ailleurs, elle permet des économies carbone substantielles.

## ■ Conclusion

Les solutions étudiées concernant des postes de consommations différents, plusieurs solutions peuvent être déployées de façon complémentaire afin de maximiser le taux de couverture en ENR du bâtiment. Il serait donc envisageable de combiner les solutions suivantes :

- **Climatisation** : les solutions étudiées sont moins pertinentes que le raccordement au réseau de froid urbain
- Production d'**Eau Chaude Sanitaire** : l'installation d'une production **d'ECS thermodynamique apparaît la plus pertinente.**
  - Le scénario 1 (production d'ECS de l'ensemble du musée) nécessite un investissement très important et des travaux impactant l'ensemble du site.
  - Le scénario 2 (production ECS restaurant Bambini) présente des gains faibles par rapport à l'investissement.
  - Le **scénario 3** (production ECS des restaurants Bambini et M.Bleu) **apparaît donc être le plus pertinent.**
  - Les solutions étudiées nécessitent le remplacement des systèmes de production actuels. Afin de profiter du système installé, et par conséquent de limiter les investissements : il peut être envisagé d'optimiser la configuration de l'échangeur actuel (dimensionnement, régulation, ...). Cette option est réalisable dans le cas des scénarii 2 et 3. Sur le périmètre des restaurants Bambini et M.Bleu, cette préconisation représente un investissement de travaux de 55 k€ HT, pour une économie annuelle estimée à 3,2 k€. Ainsi elle présentera un temps de retour sur investissement de 17 ans, calculé sur le périmètre des travaux.
- Production d'**électricité** : Installation **solaire photovoltaïque** : couverture d'une partie des consommations d'électricité du bâtiment par la mise en œuvre de panneaux photovoltaïques sur les couvertures en zinc dont la  **faisabilité structurelle et patrimoniale est à confirmer.**

**Les contraintes** liées à la mise en œuvre de verrière photovoltaïques (optimum densité de cellules photovoltaïques – Quantité de lumières transmise et gestion des apports solaires, la capacité structurelle de la charpente) **présentent des risques importants quant à la faisabilité de la solution.**

[www.egis-group.com](http://www.egis-group.com)

