

169 architecture Raphaël Ménard



FAIRE

ET REFAIRE DU VERRE

Inauguré en 1977, le Centre Pompidou (Renzo Piano et Richard Rogers, architectes) fait aujourd'hui l'objet d'une campagne de rénovation. Après quarante ans de vie, la « chenille », nom donné aux escaliers mécaniques et aux coursives de la façade ouest, réclame sa mue: une rénovation de son enveloppe de verre dont les travaux commenceront fin 2018. S'agissant de quelque deux mille vitrages courbes, ce chantier représente un enjeu important de sauvegarde d'une ressource matérielle précieuse. Les verres de cette architecture iconique ont à l'évidence une valeur emblématique.

En 2017, le cabinet d'ingénierie Elioth, en charge de la rénovation de cette façade, a suggéré l'autoréemploi d'une partie des vitrages en mettant en avant les enieux économiques et écologiques. Une large part des verres seraient démontés, nettoyés puis remis en place. Toutefois, cette stratégie ne suffisait pas à éviter la mise au rebut de plus de mille verres. Lauréate de l'accélérateur « Faire ». l'agence 169 architecture a donc proposé de réfléchir, avec Elioth, à une autre issue que la décharge pour ces splendides composants. Cet ouvrage détaille cette stratégie. Elle met en lumière un devoir des concepteurs, lanceurs d'alerte pour faire tourner la matière. Le texte décrit le gisement de cette « géométrie grise », clin d'œil à l'exposition « Matière grise » présentée au Pavillon de l'Arsenal en 2014. Au fil des pages, les propriétés de ce stock de matières finales sont caractérisées, dans le but de leur redonner le statut de matières primaires : des éléments d'architectures potentielles à venir. En dernière partie, trois esquisses illustrent plusieurs typologies de réemploi. Ces propositions sont une main tendue aux collaborations, à tous les acteurs qui souhaiteraient construire un futur avec ces matières. Au-delà de cette démonstration, alors que Paris a été le théâtre des mises en œuvre les plus sophistiquées du verre pendant les deux premières révolutions industrielles, il est urgent d'ouvrir un laboratoire urbain du réemploi du verre. Cette matière pérenne. splendide et fragile réclame une expertise spécifique. À l'heure des transitions conjuguées - climat, énergie, matière -, comment composer une verrière, une double peau avec un élément verrier de seconde main? La publication que voici souhaite aussi catalyser cette réflexion théorique et pratique.

> Raphaël Ménard, architecte, ingénieur

BRÈVE HISTOIRE DU VERRE

Les premières traces de la fabrication du verre remontent à plus de 4000 ans, en Mésopotamie. Pendant des millénaires, celle-ci est complexe et onéreuse. En 650 avant J.C., une première méthode est décrite puis, vers le 1er siècle avant notre ère, le verre fait son apparition dans la construction et change le destin du percement dans l'architecture. Les fouilles d'Herculanum ont révélé des fenêtres dotées de vitres. En 1330, Philippe de Cacqueray invente les feuilles planes et crée la première verrerie à vitre en France, à Bézu-la-Forêt. En 1691, à La Glacerie de Tourlaville dans le Cotentin, Louis Lucas de Nehou met au point le coulage des glaces de grandes dimensions; un établissement est ensuite créé à Saint-Gobain. Plus tard, l'industrie verrière bénéficie des développements de la révolution industrielle: l'apparition des méthodes d'étirage, de laminage et de fonte en continu donne naissance au verre feuilleté (1909), au verre trempé (1928) et, dès 1952, au verre structurel, conçu par Glasbau Hahn. En 1959, en Angleterre, le procédé de fabrication du verre flotté (ou procédé « float ») est finalisé par sir Alastair Pilkington. À la même époque, le développement des rayons X permet de percer le mystère de la transparence en révélant la structure amorphe d'un état vitreux.

QUELQUES REPÈRES CHRONOLOGIQUES :

- -100 / Premières fenêtres en verre
- 1670 / Industrie du verre plat en France
- 1909 / Brevet du verre feuilleté
- 1928 / Brevet du verre trempé (Securit par Saint-Gobain)
- 1952 / Début du verre structurel avec Glasbau Hahn
- 1959 / Procédé «float» par Pilkington
- **1989 /** Inauguration de la pyramide du Louvre et première mise en œuvre du verre extra-blanc

LE VERRE FLOTTÉ

Le sable est l'ingrédient essentiel du verre flotté. Le dioxyde de silicium qu'il contient apporte au mélange l'élément vitrifiant, les oxydes étant à la base du réseau vitreux. Alors que le sable fond à une température de 1 700 °C. l'adjonction d'agents de fusion permet de la réduire à 1500 °C. À la différence du sable nécessaire au béton, celui utilisé pour le verre flotté ne requiert pas de qualité particulière de rugosité. Du calcaire et/ou de la dolomite sont aioutés afin de stabiliser le mélange et d'améliorer la durabilité chimique. Le reste de la composition varie selon les propriétés requises. Dans un four chauffé à 1550 °C, le mélange de matières premières fusionne et devient une masse liquide. Puis le verre est introduit dans un four où il flotte (d'où son nom) sur un bain d'étain à une température de 1 050 °C. Lorsque la température a atteint 600 °C, la plaque de verre est sortie du bain d'étain et placée sur un convoyeur à rouleaux, qui la conduit à un tunnel de refroidissement appelé étenderie. Dans ce tunnel, le verre plat refroidit de facon régulière et sous contrôle constant, acquérant vers 500 °C les propriétés d'un solide parfaitement élastique. Pour fabriquer 1 kg de verre, soit l'équivalent d'une petite vitre carrée de 26 cm de côté et de 6 mm d'épaisseur, le processus industriel aura réclamé environ 650 g de silice et la consommation de plus de 50 l d'eau¹.

LES VERRES FEUILLETÉ, TREMPÉ, CINTRÉ

Le verre flotté est souvent une matière intermédiaire. Il peut en effet être soumis à une multitude de transformations visant à modifier ses qualités de résistance et de sécurité (par feuilletage ou par trempe), de géométrie (découpe, cintrage, bombage, etc.) ou encore d'aspect (par l'ajout de couches ou par sérigraphie).

^{1.} Jean Souviron, Producing Transparency. An Energy and Material Flows Analysis of Glazing and Membrane Facades and Their Potential of Hybridisation, mémoire de fin d'études, École des Ponts Paris Tech, 2016.

Ces procédés artisanaux et industriels génèrent évidemment des impacts écologiques supplémentaires, tant du point de vue des flux d'énergie que de la matière consommée.

Le verre feuilleté est né de la nécessité de renforcer la sécurité du verre, en particulier pour l'automobile. Édouard Bénédictus met au point dès 1909 le procédé du verre feuilleté, qui sera utile quelques décades plus tard pour faire face à la hausse constante du nombre d'accidents de la route, aggravés par le bris des pare-brise. Aujourd'hui, le verre feuilleté est constitué d'une ou deux feuilles de polymère placées entre deux couches de verre. Ce sandwich est chauffé à environ 1120 °C. Pendant ce long processus, l'intercalaire devient liquide et se mêle à la structure cristalline du verre. Il en résulte un verre de sécurité qui, en cas de rupture, voit ses fragments retenus par l'intercalaire. Notons qu'il est plus complexe de recycler du verre feuilleté, celui-ci étant devenu un matériau composite par l'ajout d'un PVB ou d'un EVA².

En 1928, Saint-Gobain brevette le procédé de trempe thermique par jets d'air. Cette méthode de renforcement, aujourd'hui courante, est intégrée dans les lignes de production du verre flotté. Le verre trempé résulte d'un processus thermique ou chimique, l'un comme l'autre permettant d'obtenir un verre précontraint environ quatre fois plus résistant que le verre recuit de même épaisseur. Le processus thermique consiste à chauffer à nouveau la vitre à 650 °C. puis celle-ci est rapidement refroidie grâce à un système de soufflage d'air à grande vitesse. Ce refroidissement entraîne un durcissement plus rapide à la surface du matériau qu'à l'intérieur : des contraintes de compression allant jusqu'à 120 MPa (mégapascals) montent en surface, contrebalancées par des contraintes de traction à l'intérieur. Le processus chimique, quant à lui, consiste à plonger la vitre dans une solution saline. Lorsqu'une feuille de verre trempée se brise, elle se divise en petits fragments aux bords non tranchants. La trempe s'avère cependant un frein à la réutilisation d'un panneau verrier, sa découpe étant impossible. Quant au cintrage et au bombage, ils s'opèrent généralement par déformation plastique d'un verre flotté, réchauffé à haute température.

^{2.} L'intercalaire peut se présenter sous forme de film, généralement poly(butyral vinylique) (PVB) ou éthylène-acétate de vinyle (EVA), ou sous forme liquide, coulée entre deux verres (résine).



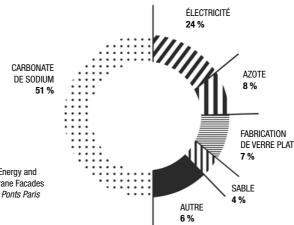


Employés de l'entreprise Sedak poussant un vitrage XXL (de 15 mètres de longueur et d'une masse de 2,5 tonnes) à l'intérieur de l'autoclave pour feuilleter le vitrage. © Sedak GmbH & Co. KG l René Müller

L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU VERRE

Les très nombreux flux d'énergie et de matières tout au long de la fabrication du verre ont un fort impact environnemental. En 2012, la production mondiale de sable siliceux était estimée entre 135 et 140 millions de tonnes, la fabrication de verre plat en représentant 31 % de la consommation. Pour le carbonate de sodium, quelques analyses du cycle de vie ont permis d'extraire des données: il représente environ 15 % du poids du verre plat, mais consomme 20% de l'énergie primaire totale utilisée dans la phase de production. Responsable de 51 % de la consommation nette d'eau douce, le carbonate de sodium ne représente que 15% environ de la masse du verre. Au-delà du carbonate de sodium, la fabrication du verre plat induit une consommation importante d'énergie et de matériaux, avec des émissions de gaz à effet de serre s'élevant à plus de 1,20 kg de CO₂ et une production d'au moins 10 kg de déchets par kilogramme de verre.

Quelle quantité de verre réclame en général une fenêtre? Un vitrage isolant courant est composé de deux feuilles de verre de 6 mm, soit environ 30 kg de verre par mètre carré de fenêtre. En supposant que la somme des transparences rapportée à la surface de plancher est d'environ 15 %, le verre pèse environ 5 kg / $\rm m^2$ de plancher. Selon l'estimation précédente, le verre d'une fenêtre de 1 $\rm m^2$ serait à l'origine de l'émission d'environ 35 kg de $\rm CO_2$. Les valeurs de « carbone gris » pour un vitrage ont été récemment évaluées entre un peu plus de 10 kg de $\rm CO_2$ et plus de 50 kg de $\rm CO_2$ pour un vitrage sophistiqué³. Évidemment, le réemploi d'un vitrage permet d'éviter les émissions d'une production neuve.



Source:
Jean SOUVIRON, Producing Transparency. An Energy and Material Flows Analysis of Glazing and Membrane Facades and Their Potential of Hybridisation, *École des Ponts Paris Tech.* 2016.

CASSER DU VERRE

En Europe, le secteur de la construction génère plus de 2 millions de tonnes de déchets verriers (Eurostat, 2010). Le verre est souvent mélangé à d'autres matériaux et mis en décharge (Glass for Europe, 2013). La recyclabilité du verre plat est pourtant excellente et offre de nombreux avantages pour l'industrie verrière: économie des matières premières et d'énergie, baisse des émissions de gaz à effet de serre.

La situation s'explique notamment par un contexte réglementaire trop peu contraignant: La cible de 70 % [directive 2008-1998/CE] pour la réutilisation et le recyclage s'applique à l'ensemble des déchets de construction et déconstruction. Cependant, le verre représentant moins de 1 % de ces déchets, cet objectif ne constitue pas une incitation à la mise en place de systèmes de collecte de verre plat. » De plus, « la directive sur la mise en décharge des déchets [directive 1999-1931/CE] ne prévoit aucune mesure spécifique concernant le verre. En tant que matériau inerte, il est facile et relativement peu coûteux de l'envoyer dans des décharges, ce qui ne favorise pas l'émergence du recyclage du verre. Pour répondre aux enjeux environnementaux, il est nécessaire de penser la fin de vie des vitrages. Le recyclage et le réemploi des verres offrent la possibilité de limiter la pression exercée par le secteur du bâtiment sur les ressources, tout en contribuant à la réduction du réchauffement climatique. Ils constituent en outre un formidable territoire d'investigation en architecture et en ingénierie de l'enveloppe.

3. Elioth, 2018, depuis la base de données Inies.





Livraison du verre brut issu d'un chantier de déconstruction de bâtiments à l'usine de recyclage de Sibelco à Crouy. © Arnaud Bouissou-Terra

«FAIRE» ET LE RÉEMPLOI DES VERRES

« C'est un bâtiment qui fait semblant, c'est une parodie de la technologie. »

Renzo Piano, architecte du Centre Pompidou (Piano et Rogers, architectes)

CAMPAGNE DE RÉNOVATION

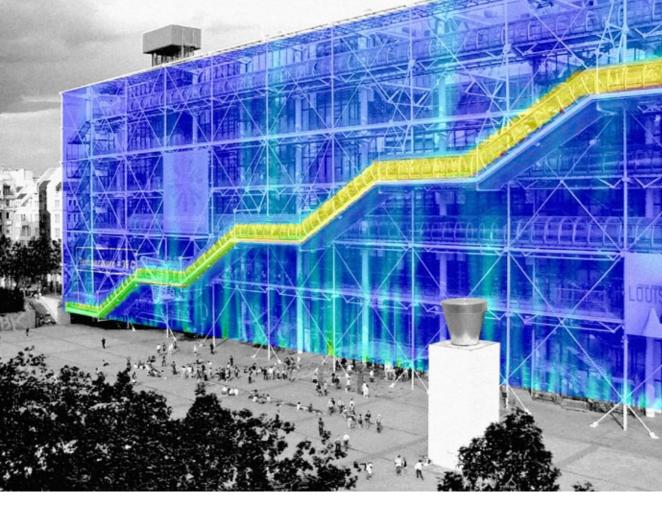
Début 2017, lors de la remise de l'avant-projet par Elioth, nous écrivions :

« Nous nous apprêtons à échanger les vitrages actuels de la chenille, par des vitrages feuilletés d'une épaisseur cumulée de 10 mm de vitrage.

Le ratio d'émissions de CO_2 typique pour un vitrage feuilleté est de l'ordre de 2,14 kg de CO_2 /kg de verre. La fourniture d'une peau neuve pour la chenille réclamera d'ores et déjà plus de 195 t de CO_2 , rien que pour le vitrage (et hors prise en compte de la logistique). La Ville de Paris s'engage sur une trajectoire de neutralité carbone pour 2050; la Ville catalyse aussi l'économie circulaire et promeut le réemploi pour le bâtiment. Dès lors, il nous semble crucial d'anticiper l'ensemble des dispositions de rénovation évitant de briser les 3 700 m² de vitrages trempés et cintrés de l'actuelle chenille. Ces magnifiques tuiles de verre, au nombre de mille deux cents, présentent des géométries idoines pour leur réemploi. Bâtiment exemplaire et iconique, ces pièces du Centre Pompidou ont une valeur sentimentale inestimable.»



© Luc Boegly



Diagnostic thermique de la chenille. Photomontage combinant une analyse thermo-aéraulique (CFD) effectuée par Elioth et les recherches de scénarios permettant d'améliorer le confort hygrothermique, plus particulièrement en situation de fort ensoleillement.

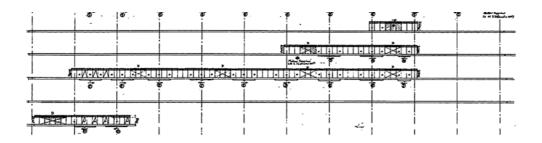
DIAGNOSTIC DU TRÉSOR

Avant d'élaborer des futurs possibles, il s'agit de décrire les vitrages à déposer, à stocker, puis à conditionner pour réemploi. Voici donc un inventaire du stock, un catalogue raisonné des éléments verriers, classés en quatre grandes familles:

- 1. Les vitrages zénithaux des galeries et de la chenille.
- 2. Les vitrages latéraux des galeries et de la chenille.
- **3.** Les verres plats au niveau des espaces de liaison entre la chenille, les galeries et le reste du bâtiment.
- **4.** Les verres spéciaux assurant l'articulation entre les paliers et les escaliers mécaniques de la chenille.

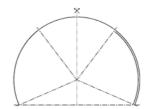
Pour chacune de ces familles, les verres sont repérés sur l'élévation générale. Sont renseignés les dimensions, le poids et le nombre de chaque type d'éléments.

VERRES ZÉNITHAUX DES GALERIES



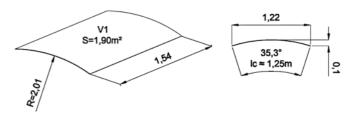
■ V1 : verre zénithal, trempé et bombé

■ **V4** : verre zénithal sur palier, trempé et bombé



V1 : verres zénithaux trempés et bombés

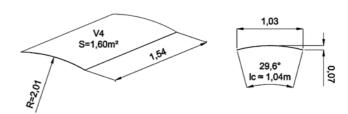
Masse: 28,5 kg Surface: 1,90 m² Nombre: 351 Surface totale: 667 m² Masse totale: env. 10 t



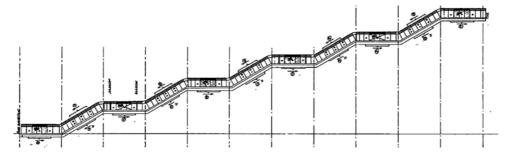
V4 : verres zénithaux sur palier, trempés et bombés

Masse : 24 kg Surface : 1,60 m² Nombre : 47

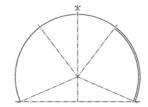
Surface totale : 75 m²
Masse totale : env. 1,13 t



VERRES ZÉNITHAUX DE LA CHENILLE



- **V16** : verres zénithaux sur palier, trempés et bombés, largeurs de 1,5 à 0,8 m
- V16.5 : verres zénithaux sur liaison, trempés et bombés



V16 : verres zénithaux sur paliers, trempés et bombés, largeurs de 1,5 à 0,8 m

Largeur 1,50 m
Nombre : 58
Masse : 28,1 kg
Surface : 1,90 m²
Largeur 1,38 m
Nombre : 72
Masse : 25,9 kg
Surface : 1,73 m²

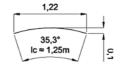
Largeur 1,42 m
Nombre : 18
Masse : 26,6 kg
Surface : 1,78 m²

Largeur 1,10 m
Nombre : 8
Masse : 20,1 kg
Surface : 1,34 m²

Largeur 1,40 m
Nombre : 10
Masse : 26,3 kg
Surface : 1,75 m²
Largeur 0,8 m
Nombre : 2
Masse : 15 kg
Surface : 1,00 m²

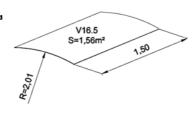
Nombre total : 168 Surface totale : 295 m² Masse totale : env. 4,43 t

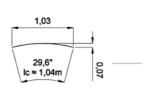




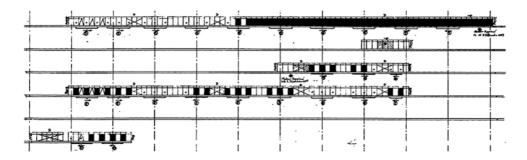
<u>V16.5 :</u> <u>verres zénithaux sur liaison,</u> trempés et bombés

Masse : 23,4 kg Surface : 1,56 m² Nombre : 18 Surface totale : 44 m² Masse totale : env. 421 kg



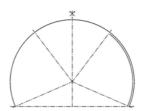


VERRES LATÉRAUX DE LA GALERIE



■ **V2**: verres latéraux, trempés et bombés

■ **V3**: verres latéraux sur ouvrant, trempés et bombés

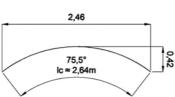


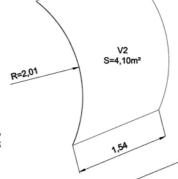
V2:

verres latéraux, trempés et bombés

Masse: 61,5 kg Surface: 4,10 m² Nombre: 66

Surface totale : 270 m² Masse totale : env. 4 t

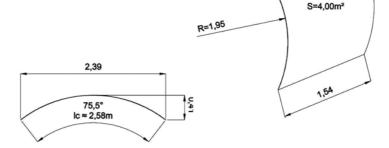




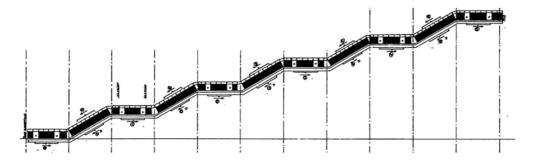
<u>V3 :</u> verres latéraux, trempés et bombés

Masse : 60 kg Surface : 4 m² Nombre : 42

Surface totale : 168 m² Masse totale : env. 2,52 t

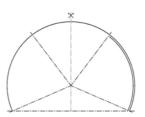


VERRES LATÉRAUX DE LA CHENILLE



■ V14 : verres latéraux, largeurs de 1,5 à 0,8 m

■ V18 : verres latéraux sur ouvrant, largeurs de 1,42 à 1,38 m



V17

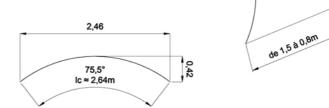
V17 : verres latéraux, largeurs de 1,5 à 0,8 m

Largeur 1,50 m Nombre : 40 Masse : 59,4 kg Surface : 3,96 m² Largeur 1,38 m Nombre : 60 Masse : 54,6 kg Surface : 3,64 m² Largeur 0,8 m Nombre : 2 Masse : 31,5 kg Surface : 2,10 m²

Largeur 1,42 m Nombre : 15 Masse : 56,3 kg Surface : 3,75 m²

Largeur 1,10 m Nombre : 8 Masse : 43,5 kg Surface : 2,90 m² Nombre total : 135 Surface totale : 498 m² Masse totale : 7,46 t

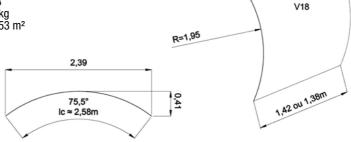
Largeur 1,40 m Nombre : 10 Masse: 55,5 kg Surface : 3,70 m²



R=2,01

V18: verres latéraux sur ouvrant, largeurs de 1,42 à 1,38 m

Nombre total : 21 Surface totale : 64,5 m² Masse totale : env. 1,12 t



VERRES PLATS DES LIAISONS PALIERS

V22

Nombre: 30

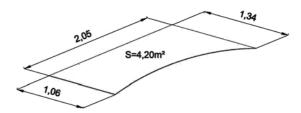
Masse: env. 33,75 kg Surface totale: env. 67,5 m² Masse totale: 1012,5 kg



V23

Nombre: 20

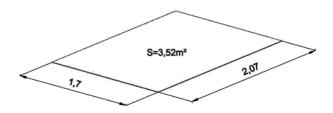
Masse : 63 kg Surface totale : env. 63 m² Masse totale : env. 945 kg



V24

Nombre : 10 Masse : 25,8 kg Surface totale : env. 35,2 m²

Masse totale: env. 528 kg

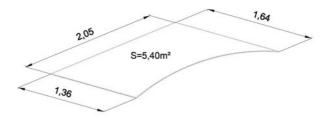


VERRES PLATS DES LIAISONS GALERIES

V25

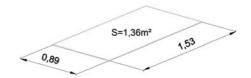
Nombre: 10 Masse: 81 kg

Surface totale : env. 54 m² Masse totale : env. 810 kg



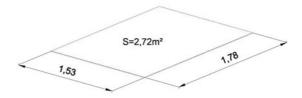
V26

Nombre : 20 Masse : 20,4 kg Surface totale : env. 27,2 m² Masse totale : env. 408 kg

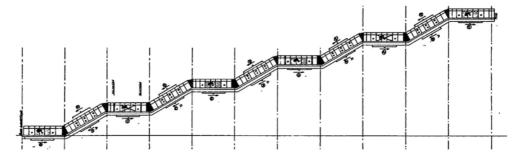


V27

Nombre : 10 Masse : 40,8 kg Surface totale : env. 27,2 m²



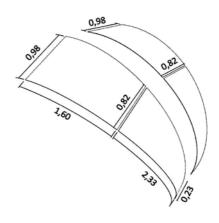
VERRES SPÉCIAUX DE LA CHENILLE



■ **V20**: verres spéciaux sur liaison palier > rampe
■ **V21**: verres spéciaux sur liaison rampe > palier

V20 : verres spéciaux sur liaison palier > rampe

Nombre : 10×4 Surface totale : env. 53 m² Masse totale : env. 795 kg



2,33

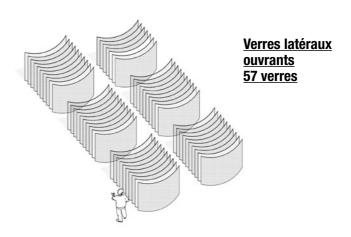
V21 : verres spéciaux sur liaison rampe > palier

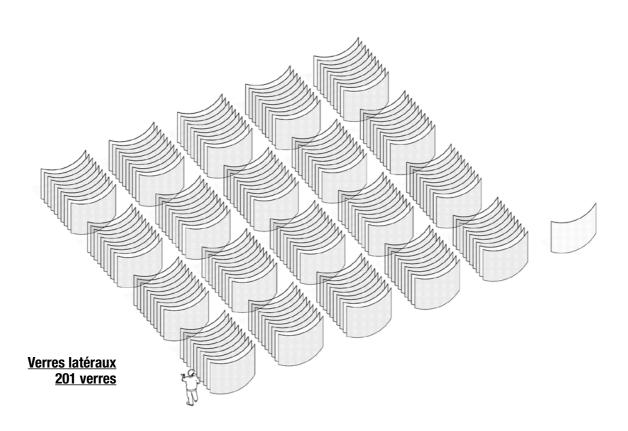
Nombre: 10 × 4 Surface totale: env

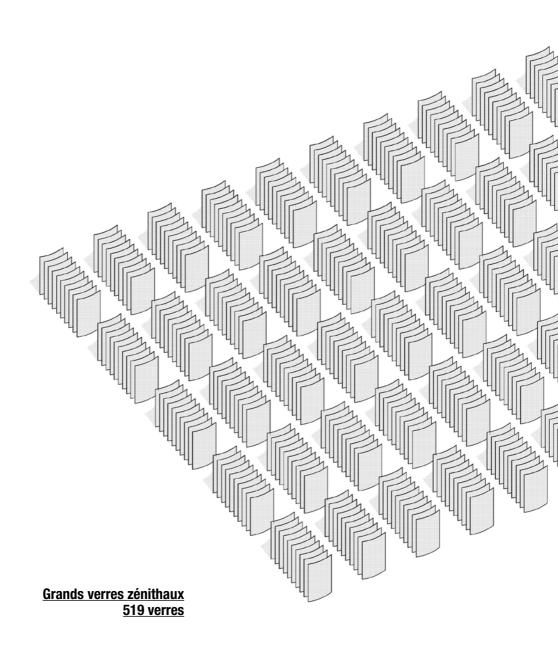
Surface totale : env. 41,5 m² Masse totale : 624 kg

STOCK CAPITAL

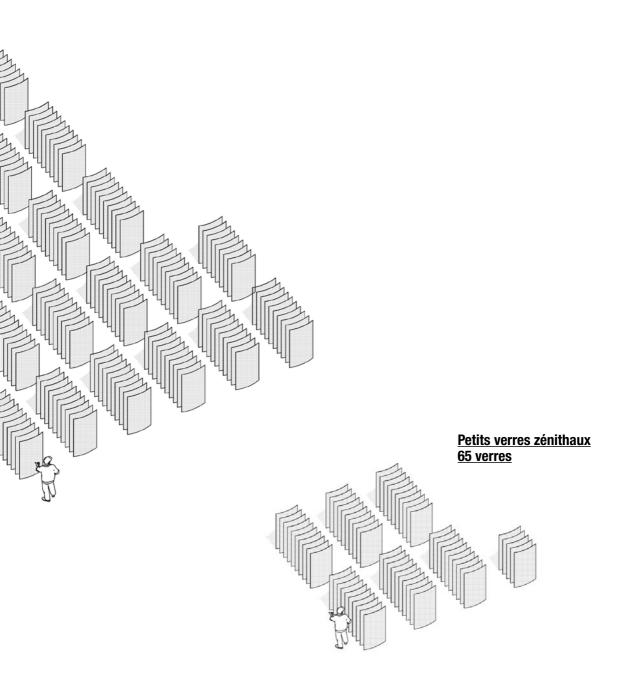
Autre argument en faveur du réemploi de la chenille: ses vitrages cintrés sont facilement empilables, posés sur leur tranche. Leur conditionnement et leur stockage sont ainsi aisés. Les vitrages destinés au réemploi seront déposés, nettoyés avant conditionnement dans des caisses, qui pourront d'ailleurs être celles ayant servi au transport des verres neufs. Le conditionnement des verres assurera leur protection aux intempéries et leur bon maintien lors des phases de manutention et de transport.







Images : 169 architecture



PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Le nouvel usage des vitrages suppose de tester leur résistance selon les configurations de leur réemploi potentiel. Plusieurs simulations aux éléments finis ont été réalisées afin d'analyser les potentiels de chargement en fonction des principes d'attache et des conditions d'appui. Selon le critère d'une contrainte principale à ne pas dépasser, ces études structurelles permettent de circonscrire le champ des réemplois possibles.

FICHE D'IDENTITÉ TYPIQUE D'UN VITRAGE

Âge: 41 ans Épaisseur: 6 mm

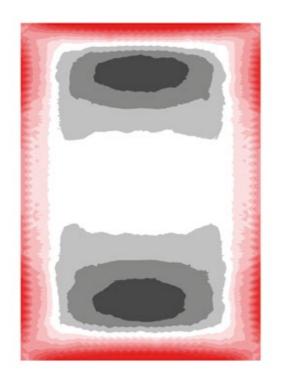
Masse surfacique: 15 kg/m² Nature de la trempe: thermique

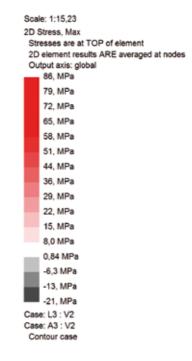
Caractéristiques mécaniques à la livraison: 20 MPa

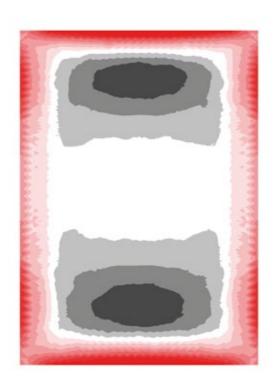
Caractéristiques mécaniques actuelles : à caractériser par essais

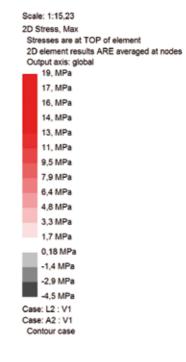
Défauts constatés: néant

Étude aux éléments finis et visualisation des contraintes principales selon différentes configurations d'appui et sollicitations mécaniques. Images : Elioth









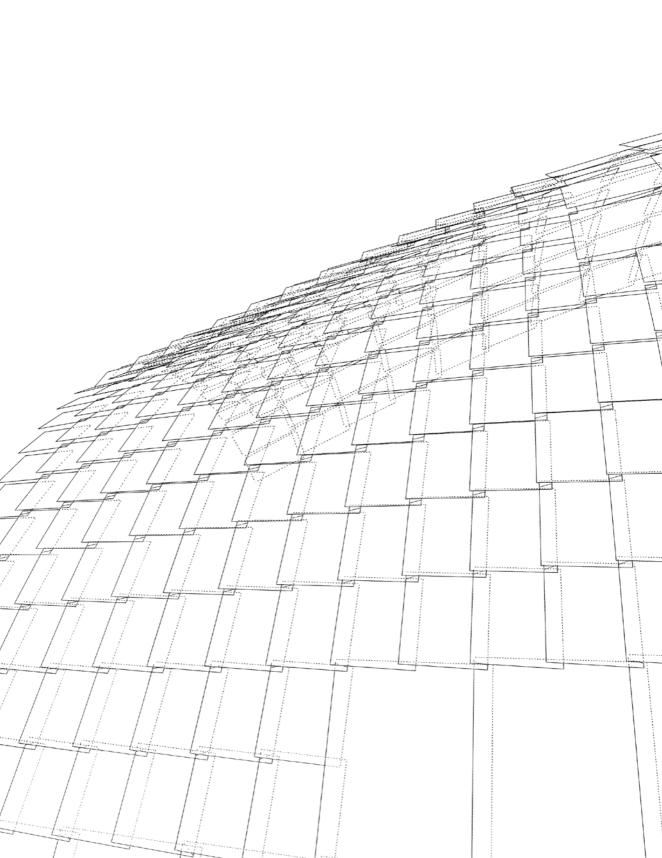
EXPLORATIONS D'ASSEMBLAGE

TECHNIQUE DU CLIN

Une première typologie d'assemblage consiste à tuiler les vitrages. La technique du clin permet de réaliser des enveloppes étanches à l'eau sans mise en œuvre de joints entre les éléments. L'étanchéité est en effet assurée par le recouvrement successif des éléments dans le sens de la pente. Ce recouvrement géométrique autorise aussi une grande variété de formes.

Ce principe est particulièrement adapté au réemploi puisqu'il s'accommode d'imprécisions concernant les dimensions des éléments. À cette fin, ont été développés des scripts de modélisation paramétrique, qui permettent de calepiner toute forme « gauche » à partir de briques géométriques données.

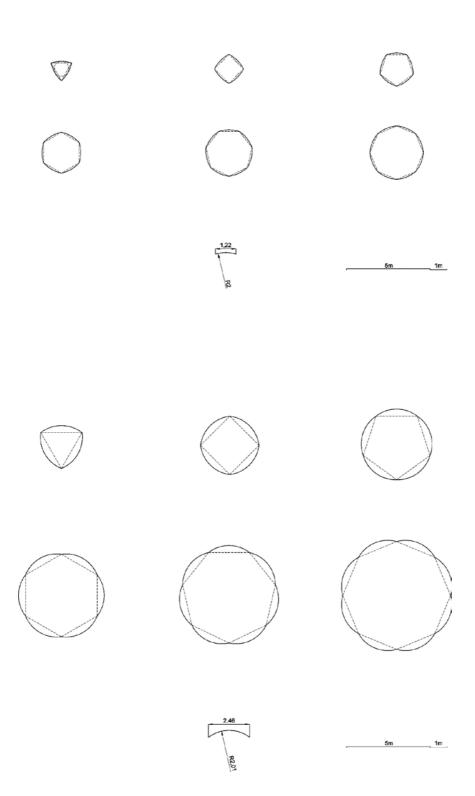
Image: 169 architecture



VERRES JOINTIFS

Les clins offrent une infinité de géométries capables. Il s'avère donc intéressant de tester des formes triviales et contraintes par la géométrie même des composants verriers. L'élément typique de la chenille est en effet un arc de cercle. En tenant compte de la contrainte de bords jointifs, quel est l'inventaire des formes possibles? Selon une composition polygonale, quelle est la correspondance entre le nombre de côtés et la dimension de l'espace généré? Ces quelques dessins permettent de tester les potentialités de composition en plan ou en coupe.

Image: 169 architecture

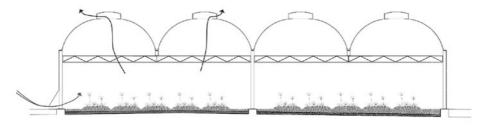


TENDES SCÉNARIOS

Les trois scénarios présentés ci-après illustrent autant de typologies possibles de réemploi. Le premier présente une seconde vie évidente et triviale: par la construction de serres dédiées à l'horticulture ou au maraîchage avec des vitrages assemblés de façon jointive. Le deuxième scénario est une architecture de plain-pied, donnant libre cours à une multitude de topologies et de formes capables, en exploitant le clin. Enfin, la troisième esquisse démontre les capacités de réemploi des vitrages de la chenille en tant que façade ou écran d'un édifice.

LA SERRE UPCYCLÉE

Verres zénithaux réemployés pour l'enveloppe des serres au niveau du faîtage de chaque chapelle. Verres latéraux réemployés au niveau des voûtes pour l'enveloppe des serres au niveau de chaque chapelle. Stockage de l'eau de pluie pour assurer l'arrosage des plantations. Les verres verticaux plats sont neufs. Une structure légère en acier et aluminium, entièrement préfabriquée et facilement démontable. Images: 169 architecture, Elioth



Coupe transversale sur la serre et dispositif passif de ventilation

La première proposition de réemploi consiste à construire des serres bioclimatiques en situation urbaine. Cette recherche typologique préfigure une « architecture capable » liée aux tuiles de verre.

Servant un projet d'agriculture urbaine dans Paris,



MUTATION DE LA CHENILLE



Image: Elioth, 169 architecture



Hommage au splendide Travelling Pavilion réalisé par Renzo Piano et Peter Rice pour IBM en 1983, le pavillon itinérant que nous proposons allie une structure légère en bois et des écailles de verre réemployées. Ces dernières protègent le bois des intempéries, tandis que la matière biosourcée supporte le verre. Modulaire, démontable, la structure est composée de panneaux de bois renforcés par des tasseaux. Leur géométrie suit les isostatiques de la voûte.

Ce pavillon pourrait abriter une bibliothèque, une galerie d'exposition, un espace de séminaire... La qualité lumineuse de l'espace intérieur sera assurée par les percements pratiqués dans les panneaux de bois, de part et d'autre des tasseaux, offrant un éclairage indirect. À hauteur d'yeux, des ouvertures permettront une échappée visuelle vers le paysage et l'horizon. Le climat intérieur recourt aux principes bioclimatiques, par un contrôle de la convection de la couche d'air comprise entre les éléments verriers et la voûte de bois. Mutation de la chenille, ce petit édifice peut être adapté à une multitude de topologies, de dimensions, de situations et de topographies

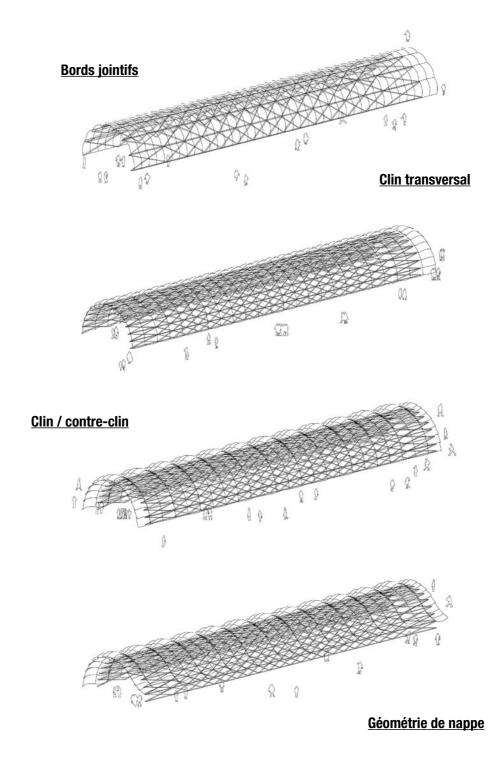
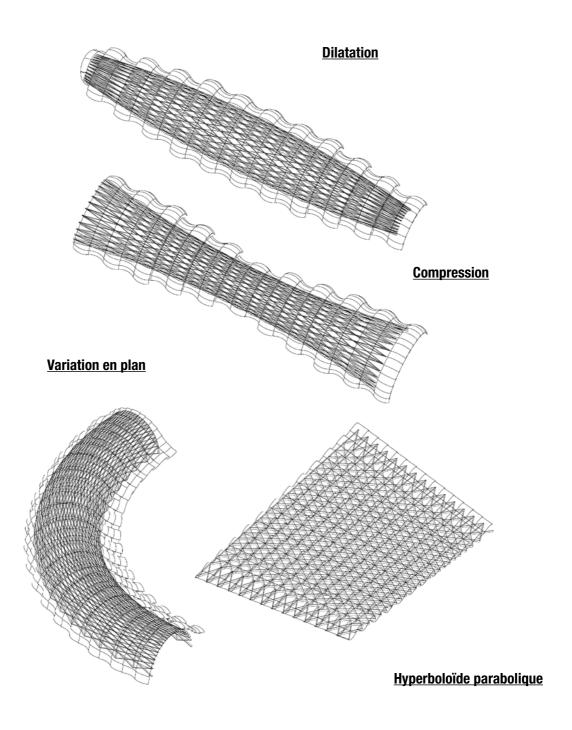
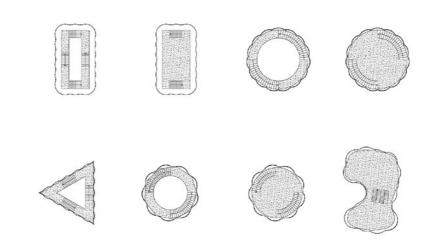


Image: 169 architecture

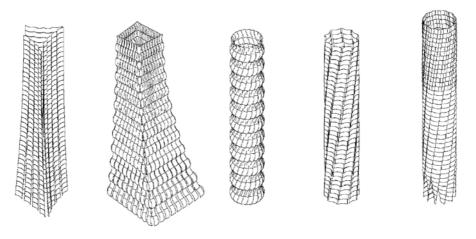


Ces dessins illustrent la multitude des géométries capables pour un pavillon horizontal. Ces mutations de la chenille, fruit de la conception paramétrique, sont autant d'options formelles et programmatiques.

UN SIGNAL EN RÉEMPLOI POUR 2024



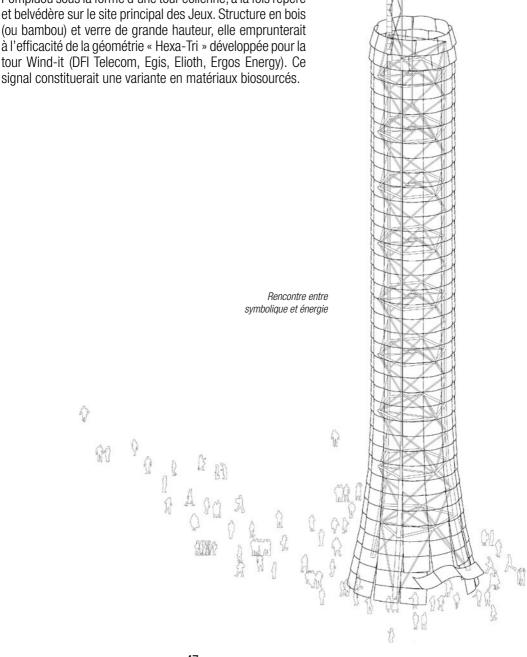
Recherche géométrique en plan



Essais d'élancement et de calepinage

Images: Elioth, 169 architecture

Cette proposition tient compte de l'actualité de la métropole du Grand Paris et de sa nomination pour l'organisation des Jeux olympiques de 2 024. Résolument engagé sur les défis environnementaux, notamment à l'égard des infrastructures olympiques, le Comité de candidature pourrait envisager de réemployer des verres du Centre Pompidou sous la forme d'une tour éolienne, à la fois repère et belvédère sur le site principal des Jeux. Structure en bois (ou bambou) et verre de grande hauteur, elle emprunterait à l'efficacité de la géométrie « Hexa-Tri » développée pour la tour Wind-it (DFI Telecom, Egis, Elioth, Ergos Energy). Ce signal constituerait une variante en matériaux biosourrés



CONCLUSION

À l'heure où les acteurs de la construction prennent conscience de la finitude des matières disponibles, le réemploi devient enfin une thématique importante de recherche et d'expérimentations. Souhaitons que cette pratique (re)devienne rapidement un mode opératoire usuel. Cet ouvrage a décrit les enjeux écologiques d'une matière essentielle à l'architecture contemporaine, le verre. Un matériau hautement spécifique, qui réclame des efforts de recherche et de créativité dédiés. Le réemploi des vitrages de la chenille du Centre Pompidou offre une magnifique opportunité d'expérimenter et de démontrer la validité de ce programme. Grâce à la recherche effectuée dans le cadre de « Faire », nous sommes persuadés de la viabilité des scénarios présentés et espérons trouver des partenaires pour les concrétiser.

CHIFFRES CLÉS DU STOCK

VERRES	MASSE PAR VITRAGE	NOMBRE	NBR VERRES PAR BOÎTE	MASSE PAR BOÎTE	NBR DE BOÎTES
NOMENCLATURE	KG			KG	
V1 V2 V3 V4	28.5 61.5 60 24	351 66 42 47	27 11 11 24	770 677 660 576	13 6 4 2
V14 - 1,50 m V14 - 1,42 m V14 - 1,40 m V14 - 1,38 m V14 - 1,10 m V14 - 0,80 m	59.4 56.3 55.5 54.6 43.5 31.5	40 15 10 60 8 2	10 8 10 12 10	594 450 555 655 411	4 2 1 5
V16 - 1,50 m V16 - 1,42 m V16 - 1,40 m V16 - 1,38 m V16 - 1,10 m V16 - 0,80 m V16.5	28.1 26.6 26.3 25.9 20.1 15 23.4	58 18 10 72 8 2 18	29 18 10 24 28	815 479 263 622 612	2 1 1 3
V18 - 1,42 m V18 - 1,38 m VERRES SPÉCIAUX	54.5 53	3 18	21	1118	1
V20 V21 VERRES PLATS		40 40	40 40	795 624	1 1
V22 V23 V24 V25 V26 V27	33.75 63 52.8 81 20.4 40.8	15 20 10 10 20	40 10 10 10 20 10	506 630 528 810 408	2 2 1 1 1 1

REPÈRES

BIBLIOGRAPHIQUES

Bill ADDIS, Building: 3000 Years of Design Engineering and Construction, Londres, Phaidon Press, 2007

Julian M. ALLWOOD, Jonathan CULLEN, Sustainable Materials – With Both Eyes Open: Future Buildings, Vehicles,

Products and Equipment - Made Efficiently and Made With Less New Materials, Cambridge, UIT Cambridge, 2011

Michael F. ASHBY, Materials Selection in Mechanical Design, Oxford, Butterwoth-Heinemann, 2005 (1re éd. 1992)

Vincent AUGISEAU, *La Dimension matérielle de l'urbanisation. Flux et stocks de matériaux de construction d'Île-de-France*, thèse sous la direction de Sabine Barles, université Paris 1, 2017

Julien CHOPPIN, Nicola DELON (dir.), Matière grise, Paris, Pavillon de l'Arsenal, 2014

Anthony DENZER, The Solar House. Pioneering Sustainable Design, New York, Rizzoli, 2013

Andrea DEPLAZES, Construire l'architecture. Du matériau brut à l'édifice. Un manuel, Bâle, Birkhäuser, 2013

Gerhard HAUSLADEN, Climate Skin, Bâle, Birkhäuser, 2008

Holger KÖNIG, Niklaus KOHLER, Johannes KREISSIG, Thomas LUTZKENDORF, A Life Cycle Approach to Buildings:

Principles, Calculations, Design Tools, Munich, Detail, 2010

Heinz W. KREWINKEL, Glass Buildings, Bâle, Birkhäuser, 1998

Hubert LEMPEREUR, «Histoire de l'isolation, feuilleton en sept épisodes», d'Architecture, 2017

Arthur LYONS, Materials for Architects and Builders, Abingdon-on-Thames, Routledge, 2014 (1997)

Caroline MANIAQUE, Go West. Des architectes au pays de la contre-culture, Marseille, Parenthèses, 2014

Edward MAZRIA, The Passive Solar Energy Book. A Complete Guide to Passive Solar Home, Greenhouse and Building Design, Emmaus, Rodale Press, 1979

William MCDONOUGH, Michael BRAUNGART, *Cradle to Cradle. Créer et recréer à l'infini*, Paris, Alternatives, 2011 (éd. originale : North Point Press, 2002)

Raphaël MÉNARD, «Le pic de l'architecture», dans Matière grise, Paris, Pavillon de l'Arsenal, 2014, p. 161-168

Raphaël MÉNARD, La Renaissance des fabriques. Un monde possible en 2050, 2015

(https://issuu.com/raphael menard/docs/la renaissance des fabriques)

John PERLIN, Let It Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy, Novato, New World Library, 2013

Renzo PIANO, Carnet de travail, Paris, Seuil, 1997

Renzo PIANO, La Désobéissance de l'architecte, Paris, Arléa, 2007

Antoine PICON (dir.), L'Art de l'ingénieur, Paris, Éditions du Centre Pompidou, 1997

Navi RADJOU, Jaideep PRABHU, Simone AHUJA, Innovation Jugaad. Redevenons ingénieux!, Paris, Éditions Diateino, 2013 ROTOR, Déconstruction et réemploi. Comment faire circuler les éléments de construction?, Lausanne,

Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018

Patrick RUBIN et al., Construire réversible, Paris, Canal Architecture, 2017

Madanjeet SINGH, L'Énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature? Paris, Unesco/ France Loisirs, 1998

Jean SOUVIRON, *Producing Transparency. An Energy and Material Flows Analysis of Glazing and Membrane Facades and Their Potential of Hybridisation*, mémoire de fin d'études sous la direction de Cyril Douthe, École des Ponts Paris Tech, 2016

Michael WIGGINGTON, Glass in Architecture, Londres, Phaidon, 2002

Jan WURM, Glass Structures, Design and Construction of Self-Supporting Skins, Bâle, Birkhäuser, 2007

SOUTIEN

RENZO PIANO / RICHARD ROGERS

De: Richard Rogers < richard.r@rsh-p.com>

Objet: Pompidou Centre - Wasted Glass /Caterpillar

Date: 27 février 2018 14:00:22 UTC+1

A: "alexandrelabasse@pavillon-arsenal.com" <alexandrelabasse@pavillon-arsenal.com>

Cc: "menard.raphael@gmail.com" <menard.raphael@gmail.com>

Dear Mr Lahasse

Thank you for your letter concerning the "Architectural and programmatic strategies for the re-use of the wasted glasses of the caterpillar of the Centre Pompidou".

I am pleased to hear that you are researching how the curved glass can be re-used and would wish that it be in a sustainable way.

Please keep me informed of your research.

I sincerely apologise for the delay in responding to you.

Kind regards Richard

Richard Rogers +44 20 7746 0408

Rogers Stirk Harbour+ Partners www.rsh-p.com

RPBW

Architects

Renzo Piano Building Workshop

M. Alexandre Labasse Pavillon de l'Arsenal 21, Boulevard Morland 75004 Paris France

Paris, le 26 janvier 2018

Cher Monsieur le Directeur Général,

Je vous remercie de votre lettre concernant le projet de Raphaël Ménard, Directeur d'Elioth, intitulé « Stratégies architecturales et programmatiques de réutilisation des verres cintrés de la chenille du Centre Pompidou ».

Je suis ravi d'apprendre que ce projet puisse voir le jour grâce à la plateforme « FARE » lancée par le Pavillon de l'Arsenal. Outre l'affection très forte que je porte à ce bâtiment, sur lequel je travaille à nouveau aujourd'hui, je considère l'initiative de réemployer les vitrages actuels de la Chenille ingénieuse, mon agence et moi-mème étant particulièrement sensibles aux problématiques de développement durable.

Concernant l'invitation à contribuer à la recherche sur ce projet, je ne peux malheureusement pas vous donner une réponse favorable. De par mon implication sur les projets en cours à l'agence, je suis en effet contraint de réduire mes engagements en dehors du travail architectural, le risque étant de ne pas pouvoir donner au projet l'attention qu'il mérite. J'espère que vous comprendrez.

En vous remerciant encore de votre proposition, je vous prie d'accepter, Monsieur, mes sincères salutations,

Renzo PIANO.

Partners R.Finne B.Finner M.Coroll G.Gundi G.Bianchi E.Biglictio A.Chasya P.Goshes J.Moolholjoen E.Trzzenni A.Behedere

Menos Pears Building Workshop: 34 me des Archives, 75004 Paris France (et.) +33 (0)1 M 61-89 (0) Eas 4(3) (0)1-42 78 (0) 98 france/e-physicism. S.A.S. à capital suriable., R.C.S. Paris 432 802 429: inscription Ordre des Archivectes. IOE: S.13408: TVA. PR 25473802429.

Faire et refaire du verre

Recherche soutenue par le Pavillon de l'Arsenal dans le cadre de FAIRE Paris, 2018

Éditions du Pavillon de l'Arsenal

Centre d'information, de documentation et d'exposition, d'urbanisme et d'architecture de Paris et de la Métropole parisienne

Alexandre Labasse, architecte, Directeur général, Directeur de la publication

Marianne Carrega, architecte, Adjointe au Directeur général, Responsable des éditions

Kim Lê, Jean-Sébastien Lebreton, Fernande Njonkou Njanjo, Camelia Petre, Adrien Taraki, architectes, Commissaires d'exposition

Julien Pansu, architecte, Directeur de la communication, du multimédia et du développement des publics, avec Léa Mabille et Estelle Petit

Antonella Casellato, documentaliste, Responsable du Centre de documentation avec Claire Deambrogio et Emeline Houssard. documentalistes

Conception scientifique

169 architecture est un laboratoire d'architectures expérimentales, dédié à l'urbanisme des énergies renouvelables et à l'architecture des matières renouvelables. En lien étroit avec Elioth, 169 propose une approche singulière issue de savoirs et d'expériences de pointe sur les questions énergétiques et constructives. 169 interroge les pratiques architecturales et urbaines selon l'urgence d'une triple contrainte: épuisement des ressources, dérèglement climatique, enjeux démographiques.

Elioth est une équipe multidisciplinaire composée d'ingénieurs, d'architectes, de designers et d'experts en simulations avancées, intervenant en maîtrise d'œuvre bas carbone et en Recherche & Développement. Les activités d'Elioth s'articulent selon les thématiques suivantes : structures complexes et géométries ; enveloppes et matériaux ; énergie et climat, comprenant les expertises en carbone, confort, ambiances et, plus généralement, en physique du bâtiment et de la ville. Basé à Paris, à Lyon et à Londres, Elioth est une entité du groupe Egis.

Équipe projet

169 architecture et Elioth : Adrien Escoffier, Jean Souviron, Vincent Dellac, Sonia Zerhouni et Raphaël Ménard

Conception graphique

Warmgrey

Secrétariat de rédaction

Julie Houis

Remerciements

Le Pavillon de l'Arsenal et les concepteurs scientifiques remercient tout particulièrement :

Serge Lasvignes, Président du Centre national d'Art et de Culture Georges Pompidou

Renzo Piano et Richard Rogers, architectes, concepteurs du Centre Georges-Pompidou

l'Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la culture (OPPIC), en charge des travaux de rénovation du Centre Georges-Pompidou.

Les concepteurs scientifiques remercient :

Marianne Carrega, Julien Choppin et Nicola Delon, François Consigny, Marie Escamilla, Colin Hutchison, Alexandre Labasse, François Latour, Vincent Lerest, Patrice Lynch, Loubliana Petroff, Nicolas Prouvé, Jacques Raynaud, Benjamin Ventura, Pierre-Arnaud Voutay, Chenjie Wu.

Achevé d'imprimer sur les presse de l'imprimerie SNEL Grafics sa, en octobre 2018 ISBN 978-2-35487-045-4 Dépôt légal : octobre 2018 © Pavillon de l'Arsenal, 2018 www.pavillon-arsenal.com

IMAGE 1th DE COUVERTURE
Maquette du projet pour le Centre Pompidou.
© Fondazione Renzo Piano © Studio Piano & Rogers,
architects

IMAGE 4^{ème} DE COUVERTURE © Centre Georges Pompidou-Bibliothèque Kandinsky-DR



refaire

et

du

verre