Introduction

Volets ajourés, moucharabiehs, vantelles, pare-soleil sous toutes leurs formes sont des éléments de construction traditionnels de l'enveloppe du bâtiment, partout sur terre.
Ces éléments conjuguent souvent diverses fonctions au-delà de la protection solaire proprement dite. En particulier, dans les pays chauds, ils offrent une clôture respirante à l'habitat. Ils sont encore, pour la plupart, réalisés en bois.

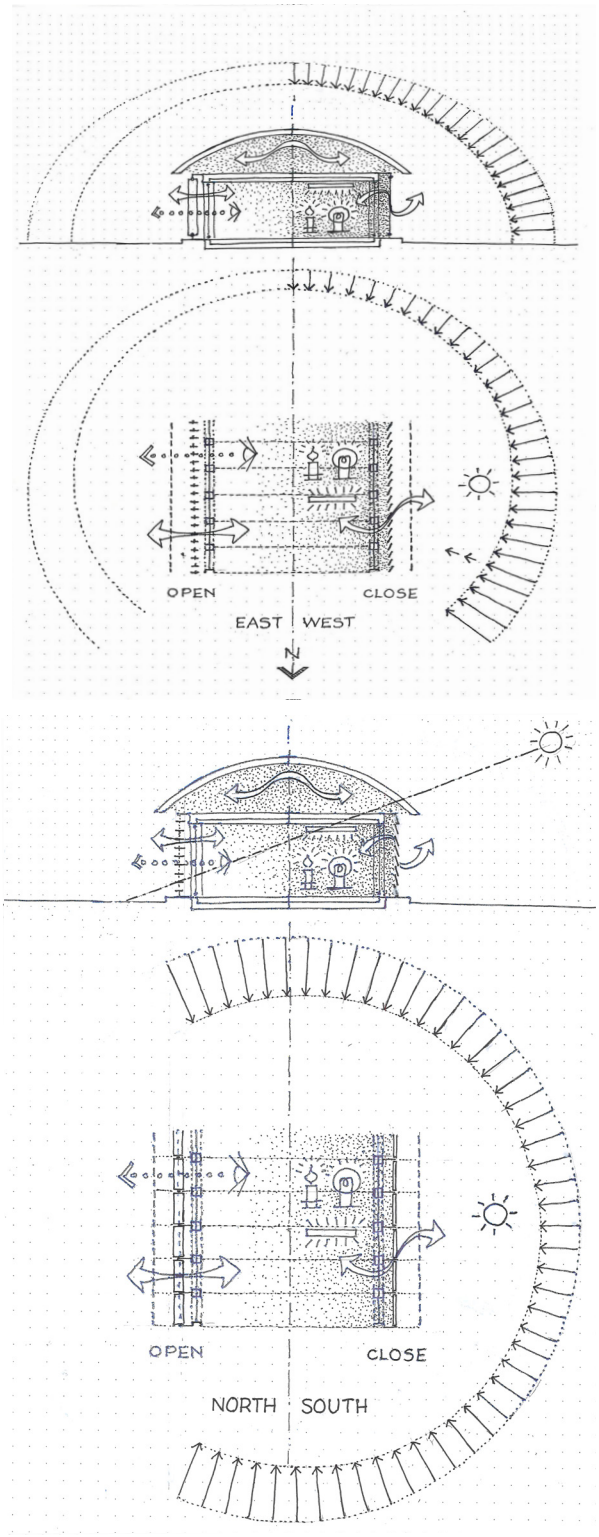


Figure 1

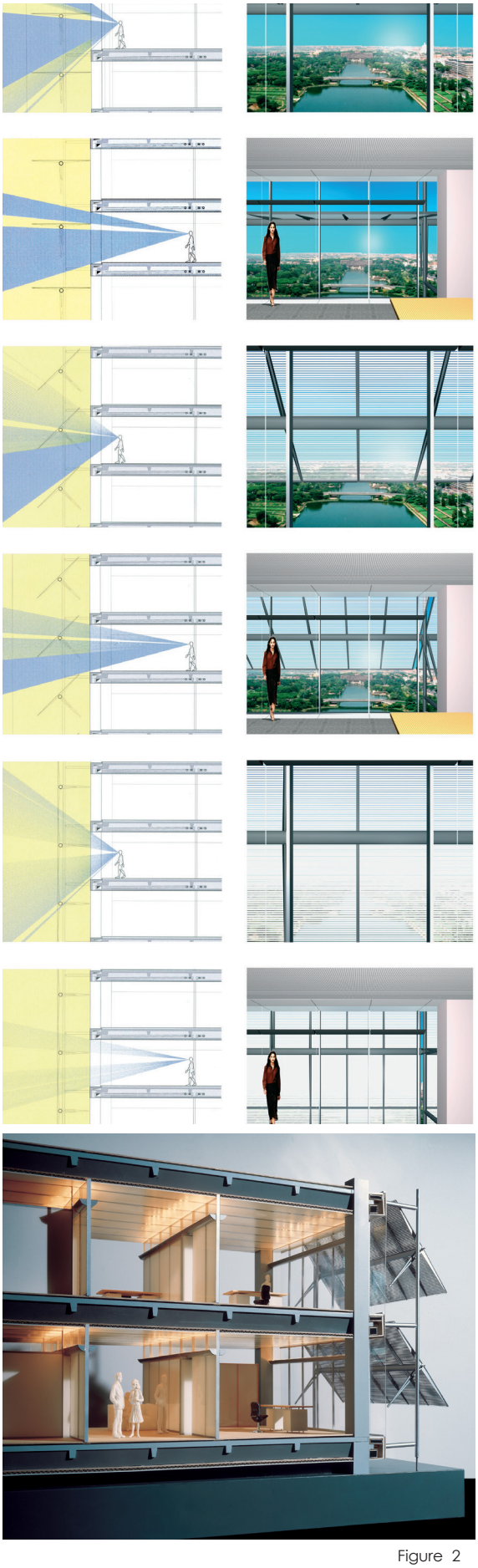
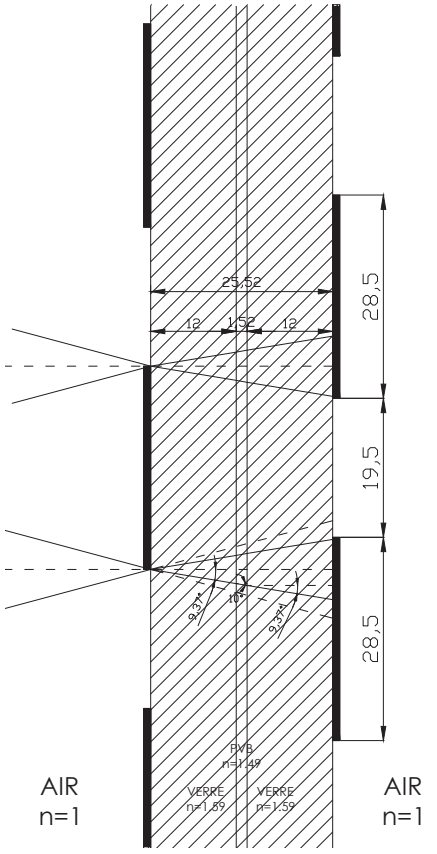
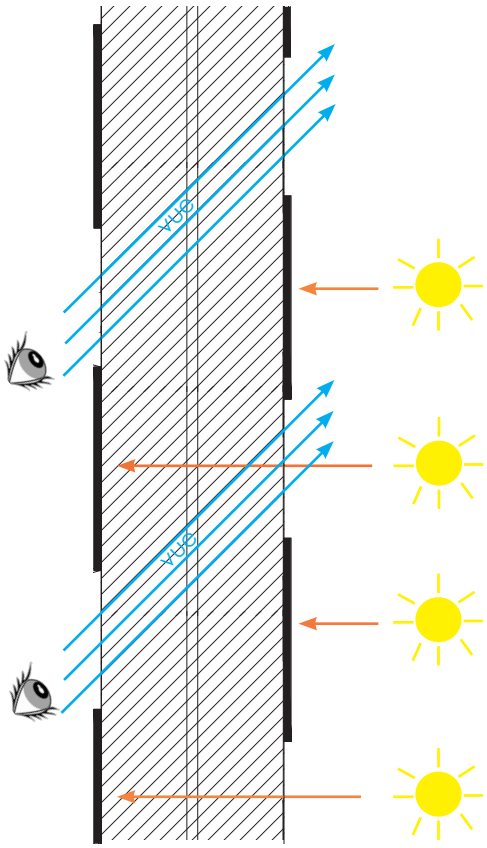


Figure 2

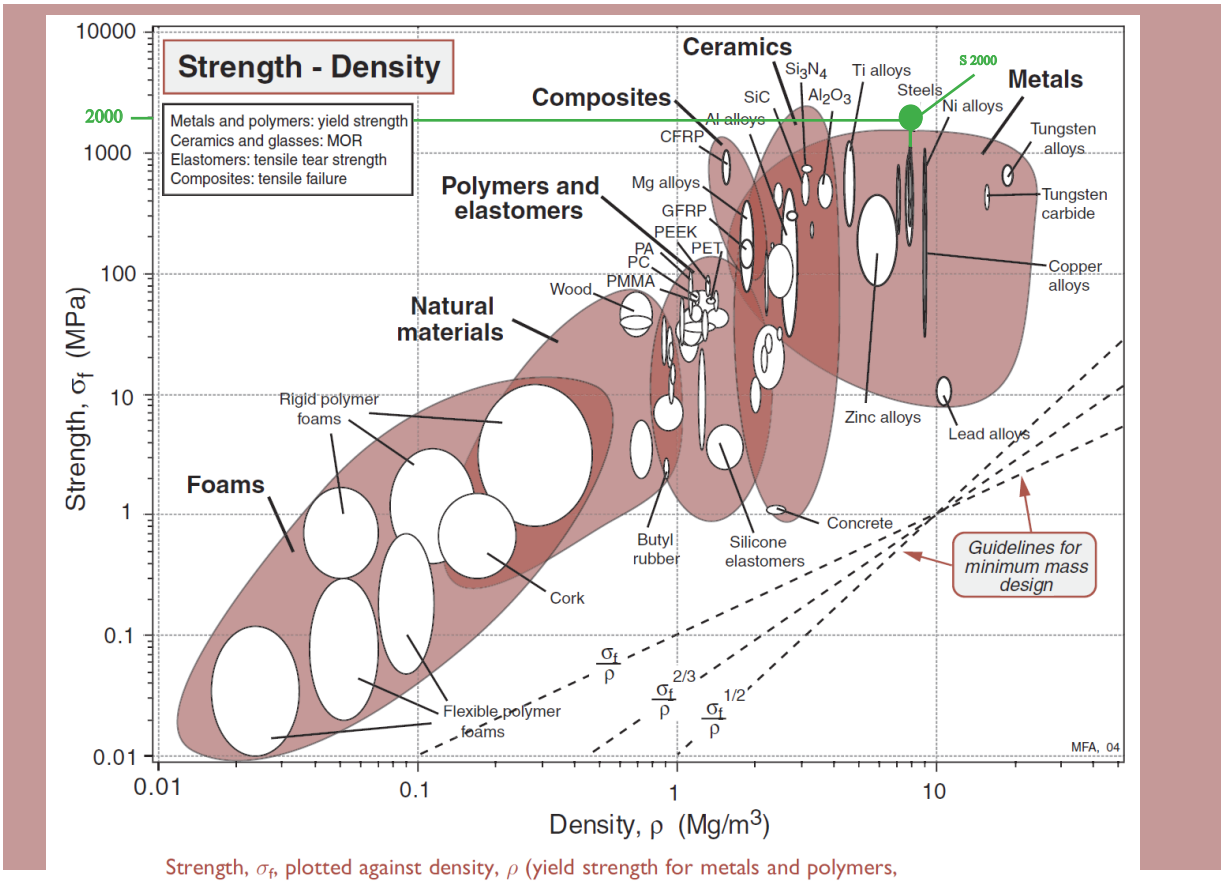


2013.01.07 - Dessin définitif pour AGC :
dimensionnement des sérigraphies des vantelles verticales.



Transparence visuelle maximale au travers de la vantelle :
(19.5/48) x (0.907 de TL)
= 33.35%

Figure 3



Strength, σ_f, plotted against density, ρ (yield strength for metals and polymers, compressive strength for ceramics, tear strength for elastomers and tensile strength for composites). The guidelines of constant σ_f/ρ, $\sigma_f^{2/3}/\rho$ and $\sigma_f^{1/2}/\rho$ are used in minimum weight, yield-limited, design.

Figure 4

Les vantelles opaques s'opposent efficacement au rayonnement solaire mais limitent inévitablement la pénétration de la lumière naturelle. Pour maximiser simultanément l'efficacité de la protection solaire et la transparence, la simple logique recommande de faire pivoter les vantelles selon la course du soleil de façon à lui rester perpendiculaires en permanence.
Si l'on place les vantelles horizontalement sur les façades Nord et Sud du bâtiment et verticalement sur leurs façades Est et Ouest, la fréquence des situations de fermeture complète diminue et la transparence globale de la façade augmente (figure 1).

Cependant, comme il est impossible d'éviter totalement la fermeture complète lorsque le soleil est proche de l'horizontale, il apparaît que la quantité de lumière naturelle pénétrant dans le bâtiment augmenterait encore fortement si les vantelles elles-mêmes présentaient une certaine transparence, mais sans que la protection solaire en soit réduite pour autant.

Dans cet esprit, dès 1998, pour la rénovation du siège de ENI à Rome (le « Palazzo Mattei », 01 375 [1] , figure 2) j'imaginai de grandes vantelles de verre clair munies sur leurs deux faces de bandes blanches distantes de leur largeur et alternées. Je pus réaliser concrètement ce concept à l'occasion de la construction du siège d'AGC Glass Europe [2] à Louvain-la-Neuve, en 2011 (01/577, figure 3) pour offrir un bâtiment pratiquement zéro énergie avec une qualité de lumière et une transparence maximales [3] .

L'acier de haute résistance

Réfléchissant à une solution plus économique que ces vantelles de verre sérigraphiées pour atteindre le même résultat (et à l'occasion d'autres recherches visant à réduire le poids et la quantité de matière de divers éléments constructifs), j'ai été amené à étudier l'emploi de tôles et de fils très minces en acier de très haute résistance, inoxydable ou non.
Il s'agit de matériaux réels et disponibles sur le marché. C'est ainsi que du fil de 0,1 mm d'épaisseur avec une limite élastique de 4000 MPa ("Saw Wire") est utilisé pour la découpe des « pains » de silice pour cellules photovoltaïques et que des tôles également jusqu'à 0,1 mm d'épaisseur avec une limite élastique de 2000 MPa sont couramment utilisées dans l'industrie mécanique.
Il est intéressant à ce sujet de se référer au graphique repris en figure 4, dû à Michael Ashby [4], dans lequel densité et limite élastique des matériaux sont comparés et sur lequel j'ai ajouté le gros point vert correspondant à l'acier « S2000 ».
Le graphique montre que d'autres matériaux peuvent aussi présenter le même ratio de performance « Résistance/Densité ». L'acier présente cependant deux avantages déterminants sur ses « concurrents ». Tout d'abord, 70 % de sa production s'effectue aujourd'hui par recyclage [5] et ce chiffre ne fera qu'augmenter dans les années à venir. Proche de zéro il y a 50 ans à peine, il sera donc proche de 100 % d'ici quelques décennies. Ensuite, c'est un des rares matériaux pouvant être façonné de manière artisanale à l'aide d'un minimum d'énergie.

La vantelle en tôle mince d'acier

Une tôle en acier inoxydable à 2000 MPa, de 0,5 mm d'épaisseur par exemple, peut être obtenue en bobines de différentes largeurs et aisément profilée par des moyens artisanaux, et ce, dans les coins les plus reculés du globe. Elle peut aussi être perforée, soit industriellement en Europe [6] avant expédition, soit artisanalement au lieu de destination.

La vantelle en acier se présente sous la forme d'une tôle profilée en ondes « créneaux » (carrées, rectangulaires ou trapézoïdales) dont les « âmes » (parties perpendiculaires au plan de la vantelle, par opposition aux « ailes », qui lui sont parallèles) sont très évidées.
Elle est raidie par des bandelettes transversales. La vantelle présentée en exemple ci-après offre une « transparence propre » maximale (vue à 45°) qui atteint 83 % de celle de la vantelle en verre de 25,52 mm d'épaisseur sérigraphiée selon le même dessin.

Cette vantelle se construit comme suit (figure 5) :
Des lignes parallèles sont tracées sur la tôle dans le sens de la longueur de la vantelle à construire et définissent la largeur des ailes et la hauteur des âmes (lesquelles peuvent être différentes l'une de l'autre) de l'onde en créneaux.
De longues perforations rectangulaires sont réalisées à intervalles réguliers sur la longueur des âmes. Une quantité suffisante de matière est laissée le long des plis pour raidir les ailes après pliage.
Les côtés de la tôle sont prolongés par des languettes transversales dans l'alignement de la matière laissée entre les perforations des âmes.
Après profilage, les languettes sont repliées vers le centre de la vantelle pour former le gabarit du bord longitudinal.
Les ailes sont liaisonnées entre elles par des bandelettes de tôle qui recouvrent exactement les languettes et s'alignent sur les bords des percements des âmes.
Deux tôles « chapeau » en U viennent finalement coiffer les extrémités de l'objet pour lui conférer sa raideur au cisaillement et à la torsion.

Toutes les dimensions peuvent être choisies librement : longueur, largeur ou épaisseur de la vantelle, largeur des ailes et de leurs raidisseurs en retour sur les âmes, longueur des perforations rectangulaires dans les âmes, largeur des languettes, des bandelettes et des tôles « chapeau » rapportées), de façon à répondre de la manière la plus appropriée à chaque situation.

Avantages et inconvénient

La vantelle en acier présente divers avantages par rapport au verre :

- elle est moins coûteuse et peut être produite artisanalement en petites quantités,
- elle ne demande pas d'être régulièrement nettoyée,
- elle se déforme élastiquement sans casser,
- elle pèse 78 g/dm², soit 7,7 fois moins qu'une vantelle de verre de 25,52 mm d'épaisseur [7] ,
- elle ne filtre pas les couleurs, son indice de rendu des couleurs est donc de 100 %,
- sa résistance géométrique intrinsèque est tellement grande qu'elle peut être réalisée en papier à l'échelle ½ (figure 6), à dimensions égales, elle est 4,5 fois plus résistante en flexion que son homologue en verre [8] ,
- elle est perméable à l'air,
- elle peut non seulement être positionnée de manière classique devant le châssis de fenêtre mais aussi être intégrée entre des feuilles de verre simple comme dans le système très performant de façade développé par la société Permasteelisa [9] composé de trois feuilles de verre simple distantes de 20 cm et de deux jeux de vantelles placés entre les vitrages.

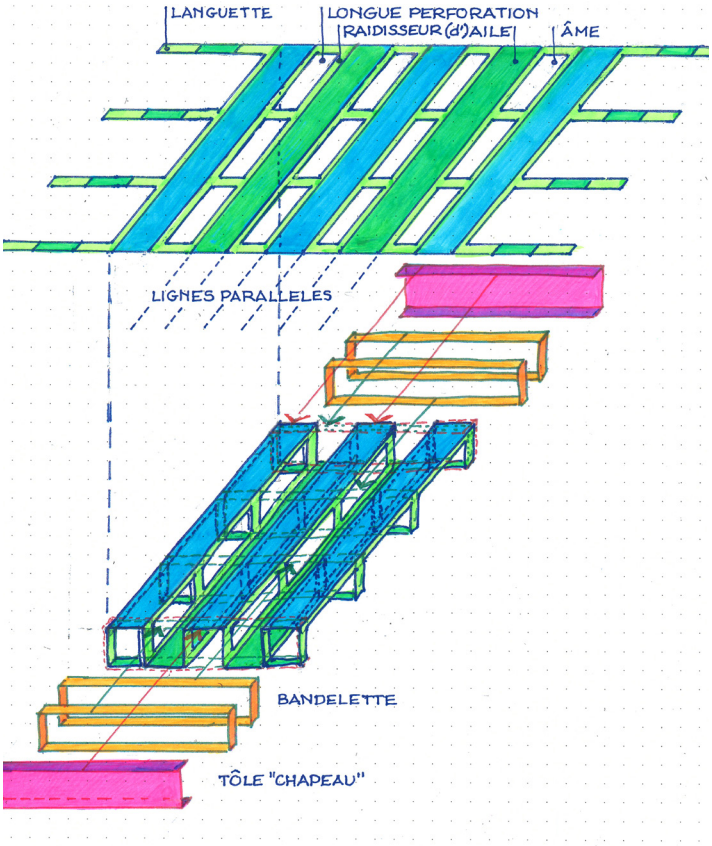
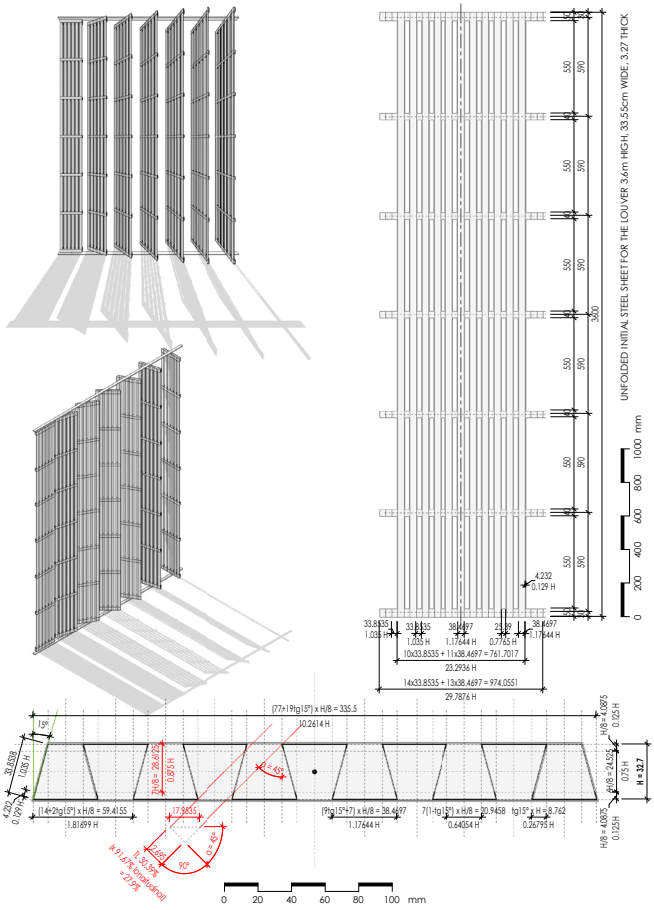


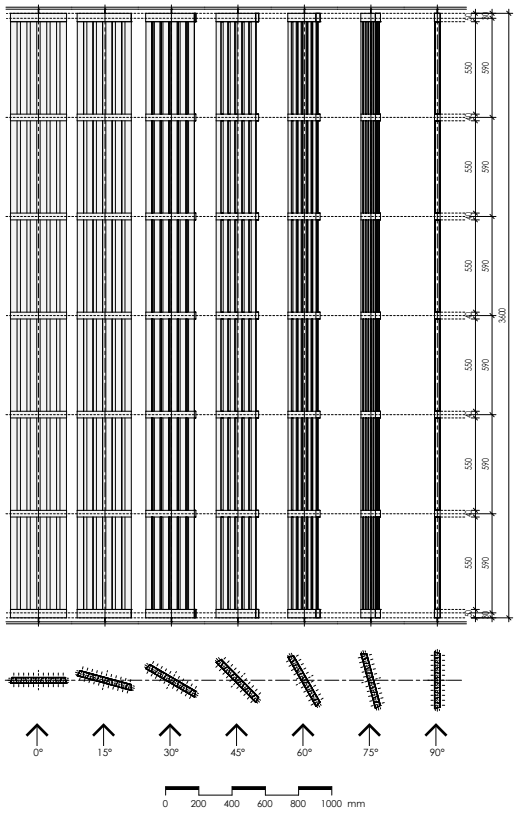
Figure 5

Figure 6



EXAMPLE OF A LOUVER 3.6m HIGH. 33.55cm WIDE (1.35m/4) AND 3.27cm THICK

Figure 7



EXAMPLE OF A LOUVER 3,6m HIGH, 33,55cm WIDE (1,35m/4) AND 3,27cm THICK TAKING THE CIRCUMSOLAR EFFECT INTO ACCOUNT

PERCENTAGE OF VOIDS ON THE LENGHT OF 360cm = 6x55/360 = 91.67%. THE OVERALL MAXIMUM TRANSPARENCY IS THUS OF 30.39% x 91.67% = 27.86% (TO COMPARE WITH A 25.52mm THICK EXTRA CLEAR GLASS LOUVER, PRESENTING A MAXIMUM TRANSPARENCY OF 33.53%. THE STEEL LOUVER PRESENTS THUS A MAXIMUM TRANSPARENCY OF 83% OF THE GLASS LOUVER.

Figure 8

Cependant, suite à la présence des bandelettes et des retours raidisseurs d'ailes sur les âmes, elle présente l'inconvénient d'être moins transparente que la vantelle en verre.

Transparences droite et oblique, effet circumsolaire

Les lignes de peintures blanches sur le verre ne sont pas complètement opaques. Elles laissent passer au total 11,2 % de la lumière et 12,5 % de l'énergie solaire.
Dans la vantelle en acier, la transparence en vision droite peut être aisément modulée en microperforant les ailes, de façon à obtenir, au choix, des valeurs de transmission égales, supérieures ou inférieures à celles de la vantelle en verre.

D'autre part, en vision oblique, le verre « extra clair » de 25,52 mm d'épaisseur, avec sa transmission lumineuse (LTI) de 90,7 % [10] , n'est pas complètement transparent.
La vantelle donnée ci-dessus en exemple atteint 83 % de cette transparence, mais l'optimisation de la perforation de la tôle d'acier et de la largeur des bandelettes doit permettre d'affiner cette valeur.

Finalement, l'effet du rayonnement circumsolaire est à prendre en considération dans le dimensionnement du pliage, en ce sens que les bandes opaques doivent être légèrement plus larges que les bandes laissant passer la lumière.

Exemple

Les figures 7 et 8 illustrent une vantelle verticale de 3,6 m de hauteur, de 33,75 cm de large (soit 1,35 m / 4) et de 3,27 cm d'épaisseur.
La largeur des raidisseurs d'ailes est ici arbitrairement fixée à 1/8 de l'épaisseur de la vantelle, soit 4,1 mm.
Sa géométrie, en coupe, tient compte de l'effet circumsolaire et présente une transparence de 30,39 %.

La présence sur sa hauteur de cinq languettes intermédiaires de 4 cm de large et de deux U « chapeaux » d'extrémités réduit la transparence maximale de la vantelle complète à 27,86 % soit 83 % de celle qu'offre la vantelle du siège d'AGC Glass Europe (soit 33,53 %).

Mécanisme

Ces vantelles doivent suivre la course du soleil de manière à toujours se présenter perpendiculairement au rayonnement solaire.

Différents mécanismes ont été expérimentés pour cela ces dernières années, entre autres par la société Colt. Celle-ci en a conclu que seul un système de tringles et de pistons présentait non seulement la fiabilité mais aussi la précision mécanique nécessaires au pilotage des vantelles par logiciel.
C'est le système que nous avons mis au point avec cette société pour le siège d'AGC, et qui continuera donc à être utilisé pour les applications sophistiquées dans nos

contrées riches. Ces vantelles en acier pourraient cependant aussi être fabriquées et utilisées dans les pays pauvres pour des constructions économiques, voire rudimentaires.
Il faudrait dans ce cas développer un mécanisme simple basé par exemple sur le principe des anciennes horloges à contrepoids et balancier, tel qu'illustré aux figures 9 et 10.
Les vantelles Sud de la figure 9, pivotant sur leur axe horizontal, sont dans le plan parallèle à la façade (position fermée) le matin à 6 h, pour s'ouvrir progressivement (sans jamais atteindre, sous nos latitudes, la perpendicularité parfaite avec la façade) jusque midi, puis revenir en position fermée à 18 h.
Les vantelles Est de la figure 10, pivotant sur leur axe vertical, sont dans le plan parallèle à la façade (position fermée) à 6 h du matin pour atteindre progressivement une position perpendiculaire à celle-ci (position ouverte) à 12 h, alors que les vantelles Ouest, perpendiculaires à la façade à 12 h, tournent progressivement pour se mettre dans un plan parallèle à la façade à 18 h.

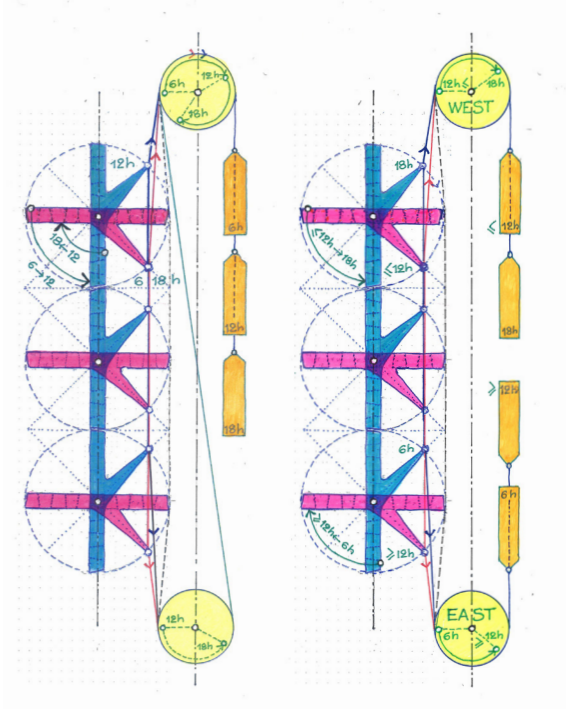
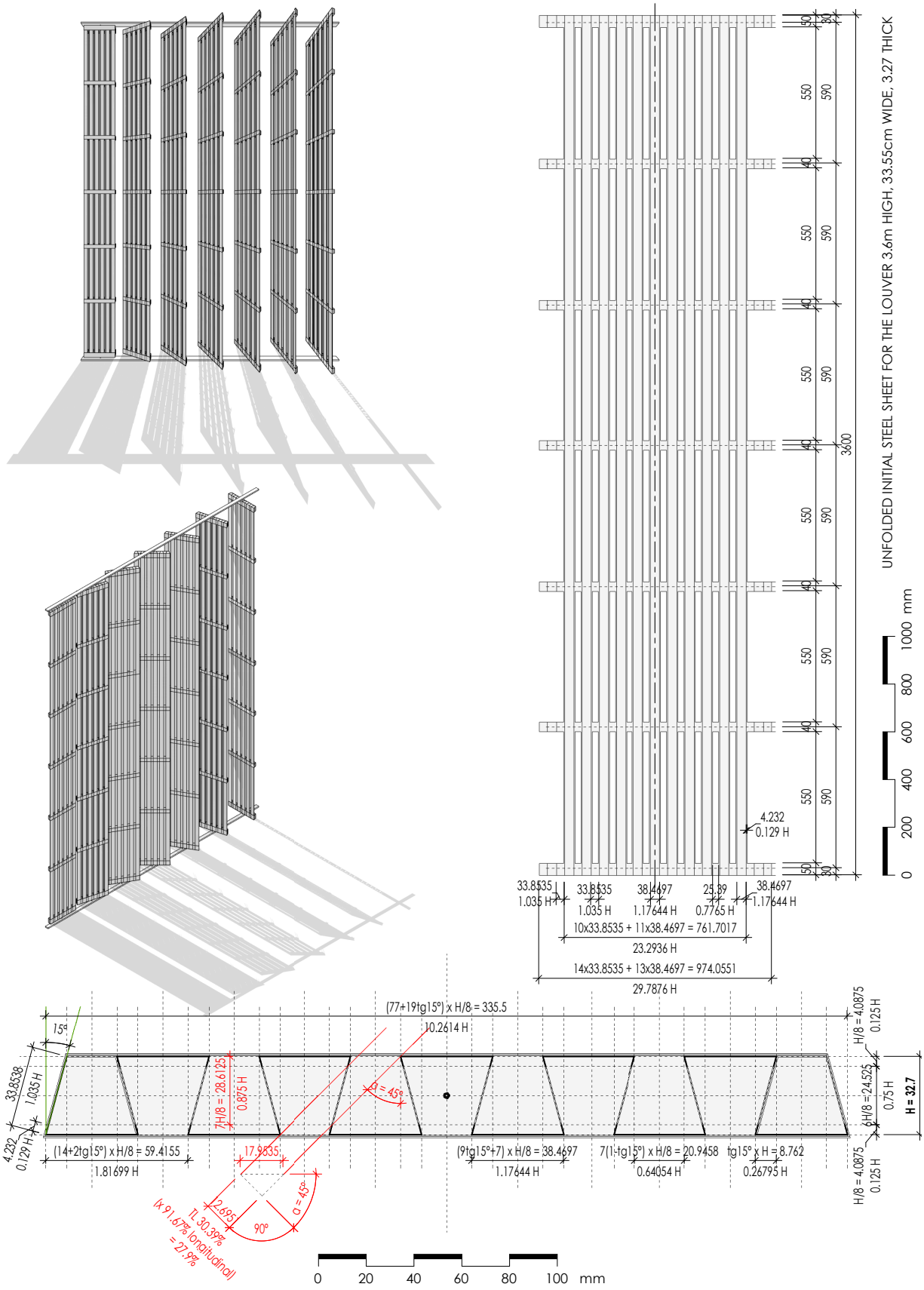


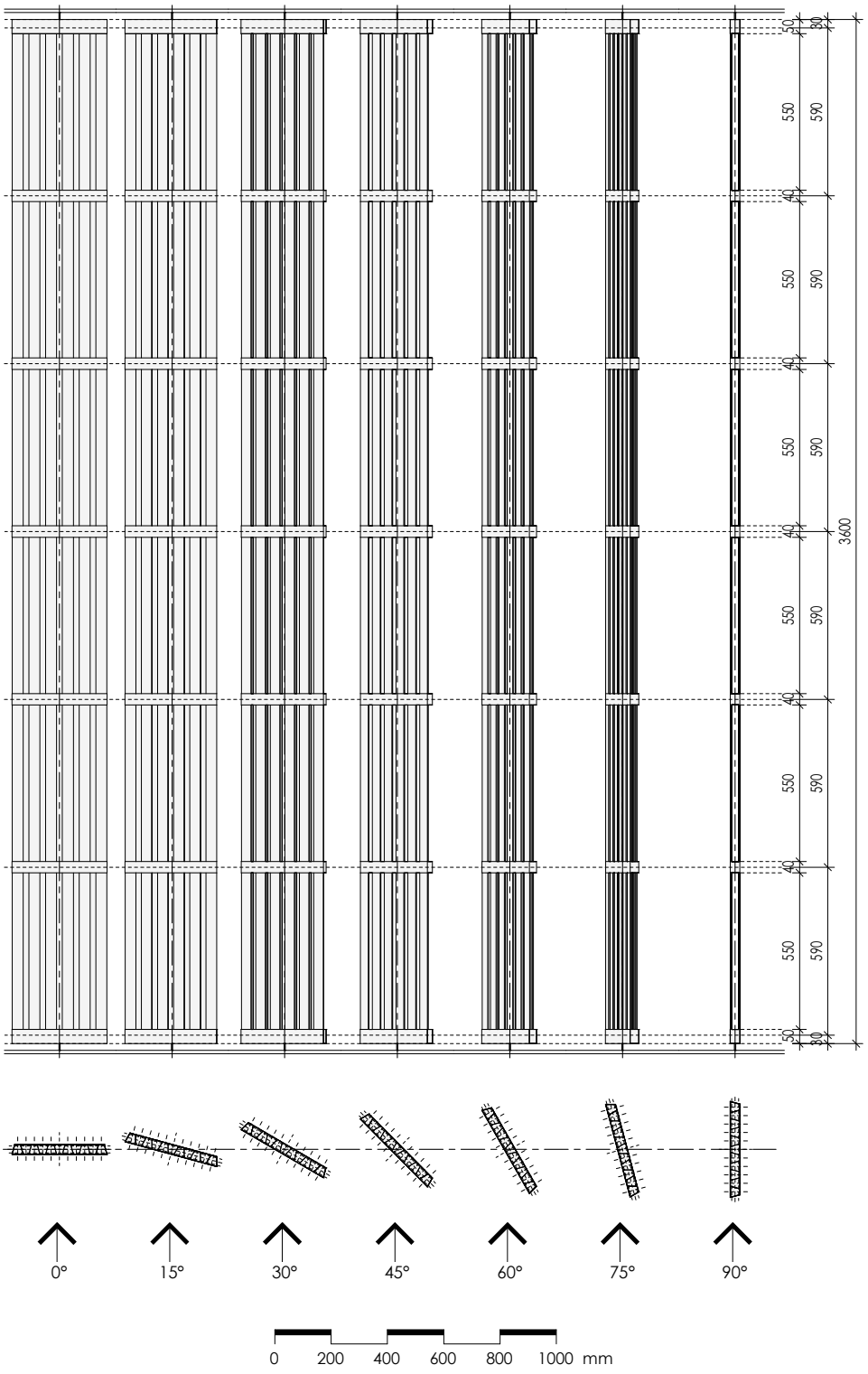
Figure 9 Figure 10

[1] Les numéros 01-xyz renvoient au numéro de dossier à introduire dans la case "recherche" sur www.samynandpartners.com pour plus de détails sur le projet.
[2] Philippe Samyn architecte et ingénieur – Jan De Coninck : "AGC Glass Building". Editions Racine, Bruxelles, mai 2014, 256 p. (en français : ISBN 978-2-87386-882-6).
[3] De nombreux autres types de vantelles en verre sont utilisés depuis des dizaines d'années en Europe sans pour autant atteindre les mêmes performances.
[4] Michael Ashby : "Materials Selection in Mechanical Design", illustration extraite du fichier pdf disponible sur Internet, 3ème édition, 2005, p 54. Voir aussi Philippe Samyn : "Etude de la morphologie des structures à l'aide des indicateurs de volume et de déplacement", Académie Royale de Belgique – Classe des Sciences, collection in 4°, 3ème série, Tome V, 2004, 482 p., ISBN 2.8031.0201.3, disponible en e-book sur www.samynandpartners.be) : voir p. 23 pour {Ma} fonction de ρ, σ et E (l'influence du matériau dans le dessin d'un élément constructif).
[5] Sustainable Steel Buildings. Edited by Milan Veljkovic, Bernhard Hauke, Markus Kuhnhenne & Mark Lawson. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2016
[6] Par exemple par RMIG, société européenne, le plus grand perforateur mondial.
[7] 0,01 dm x 1 dm² x 7800 g/dm³ = 78 g pour l'acier, et 0,24 dm x 1 dm² x 2500 g/dm³ = 600 g pour le verre (hors PVB).
[8] Deux tôles, en acier S2000, (travaillant à 120 kN/cm²), de 0,25 mm d'épaisseur moyenne et de 10 cm de largeur, séparée de 2,4 cm, reprennent un moment fléchissant de 0,025 cm x 10 cm x 2,4 cm x 120 kN/cm² = 72 kN.cm. Une feuille de verre (travaillant à 1,65 kN/cm²) de 24 mm d'épaisseur et de 10 cm de large reprend un moment fléchissant de (2,4²x10/6) cm³ x 1,65 kN/cm² = 16 kN.cm.
[9] Ces développements sont faits par leur filiale « Scheldebouw » aux Pays-Bas.
[10] Deux fois 4 % sont réfléchis aux interfaces entre le verre et l'air, deux fois 0,6 % sont absorbés par les deux feuilles de verre de 12 mm d'épaisseur et 0,1 % par l'intercalaire en PVB de 1,52 mm d'épaisseur. Il est à noter que l'emploi de verre antireflet augmente jusque 97 % la transmission lumineuse.



EXAMPLE OF A LOUVER 3,6m HIGH, 33,55cm WIDE (1,35m/4) AND 3,27cm THICK

Figure 7



EXAMPLE OF A LOUVER 3,6m HIGH, 33,55cm WIDE (1,35m/4) AND 3,27cm THICK
TAKING THE CIRCUMSOLAR EFFECT INTO ACCOUNT

PERCENTAGE OF VOIDS ON THE LENGHT OF 360cm = 6x55/360 = 91.67%. THE OVERALL MAXIMUM TRANSPARENCY IS THUS OF 30.39% x 91.67% = 27.86% (TO COMPARE WITH A 25.52mm THICK EXTRA CLEAR GLASS LOUVER, PRESENTING A MAXIMUM TRANSPARENCY OF 33.53%. THE STEEL LOUVER PRESENTS THUS A MAXIMUM TRANSPARENCY OF 83% OF THE GLASS LOUVER.

Figure 8