

03/17 steeldoc

Ouvrages d'exception



Un géant dans sa résille

Maître de l'ouvrage

Amagerforbrændingen, Copenhague

Architectes

BIG – Bjarke Ingels Group, Copenhague

Ingénieurs de la structure porteuse

MOE, Danemark

Ingénieurs des façades

Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieur, Zurich

Achèvement

2017



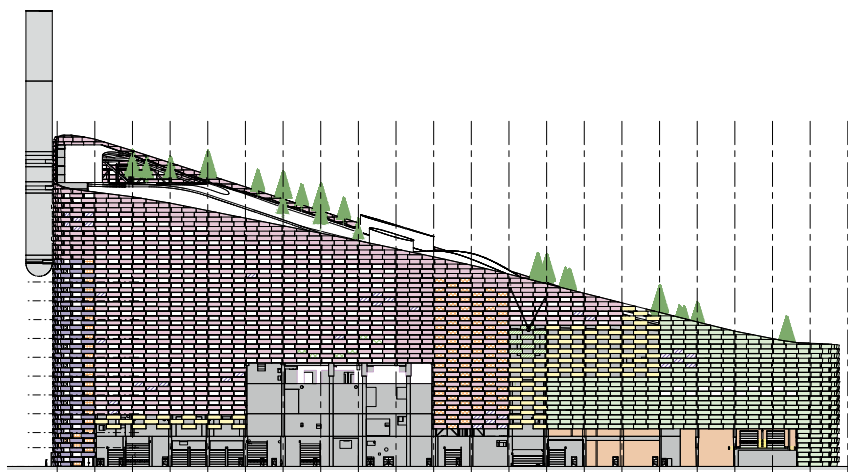
Plan de situation, échelle 1:100 000.

Monumentale, la façade du nouveau centre de valorisation des ordures ménagères de Copenhague l'est assurément. Une résille en 3D, développée par le bureau d'études Dr. Lüchinger + Meyer, l'enveloppe et renforce parfaitement le concept architectural de Bjarke Ingels Group.

Il ne manque plus qu'une piste de ski sur le toit de l'installation ! Boutade ? Non. Celle-ci ne va effectivement pas tarder à être mise en service. Amagerforbrænding, le maître de l'ouvrage, suit depuis 2011 les études et la construction de l'Amager Resource Center, la nouvelle usine de valorisation énergétique qui devrait entrer en service avant la fin de l'année. Elle alimentera chaque année 140 000 foyers en chaleur et 550 000 habitants en électricité, produites à partir des 400 000 t d'ordures ménagères traitées.

La nouvelle usine est implantée dans le détroit de l'Øresund, à proximité de l'ancienne usine d'incinération et d'une centrale à charbon, dans un quartier industriel qui est aussi urbain. L'ouvrage s'inscrit dans la skyline de la capitale danoise, entre le palais royal et l'opéra. Dans ce contexte urbain, ses dimensions imposantes – 200 × 60 m en plan, pour une hauteur de 90 m –, en font un signal visible de très loin. Ceci a

Bien que d'aspect homogène, l'enveloppe remplit des fonctions différentes selon les unités fonctionnelles qu'elle abrite à l'intérieur du bâtiment.



amené le maître de l'ouvrage à lancer, en 2010, un concours d'architecture destiné à définir, entre autres, la volumétrie du bâtiment et son enveloppe. Le cabinet d'architectes BIG – Bjarke Ingels Group a remporté le concours avec un projet insolite : il donnait au volume fonctionnel une forme originale, l'enveloppait d'une façade, plantée, vouée à faire sensation, et surtout, le rendait accessible au public. On est loin de la sécheresse d'une installation purement industrielle, refermée sur ses machines et sa technologie de pointe. Au contraire, en dépit de sa taille, la nouvelle usine de valorisation s'intègre avec tact dans le site, respectant les constructions qui l'entourent, allant même jusqu'à laisser le site reconquérir le bâtiment. Même la cheminée est plus qu'un simple tube crachant des fumées : pour chaque tonne de CO₂ brûlée, telle un index tendu, elle relâchera un véritable rond de fumée, une manière enjouée de montrer du doigt les enjeux environnementaux.

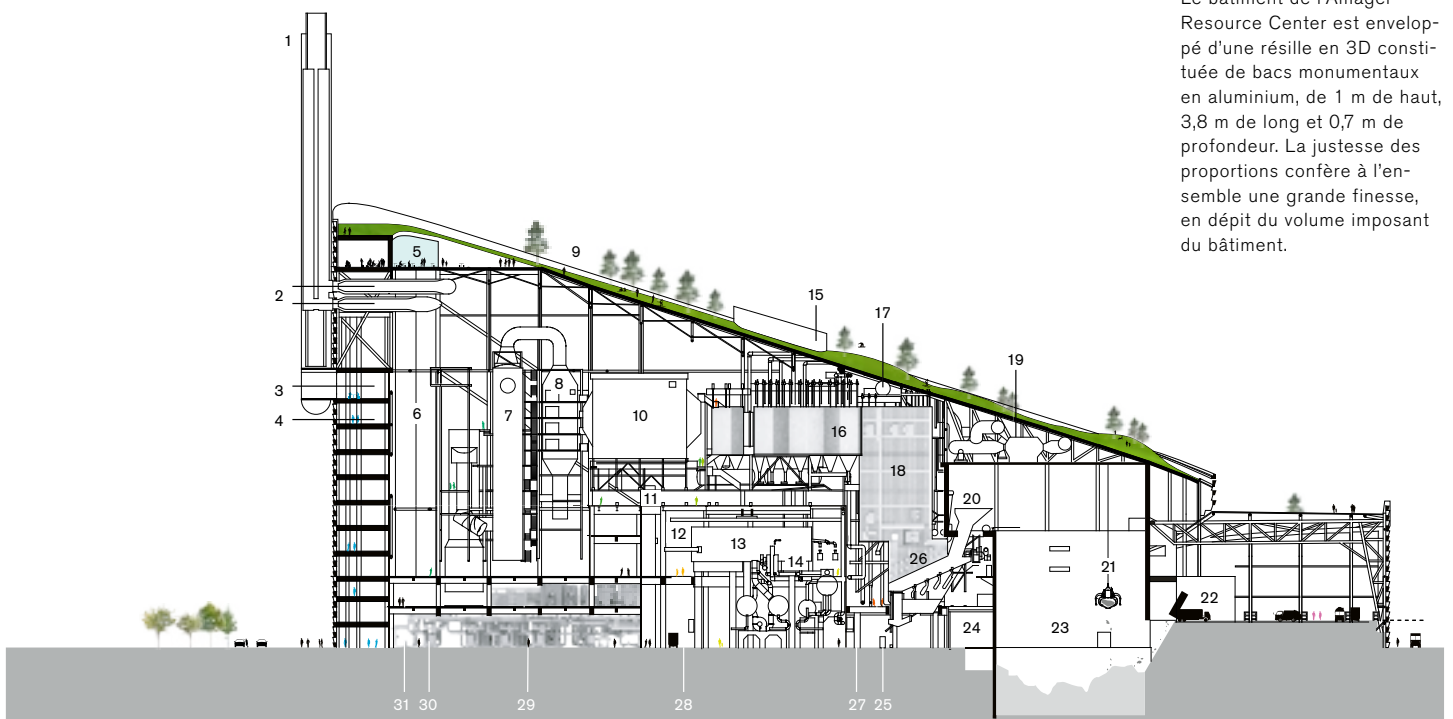
De nombreuses fonctions sous un même toit

L'Amager Resource Center est constitué d'ensembles fonctionnels distincts, tous réunis dans un même volume, en forme de rampe. La fosse de réception des déchets est une structure en béton armé conventionnelle tandis que la structure du bâtiment d'administration, qui comporte onze niveaux, est de type mixte acier-béton. Une charpente métallique constituée de poutres (S355 et S460) et de poteaux (S235) vient envelopper l'ensemble, générant à la fois l'imposant volume intérieur où se logent les machines et la halle de réception et la silhouette extérieure si caractéristique du bâtiment.

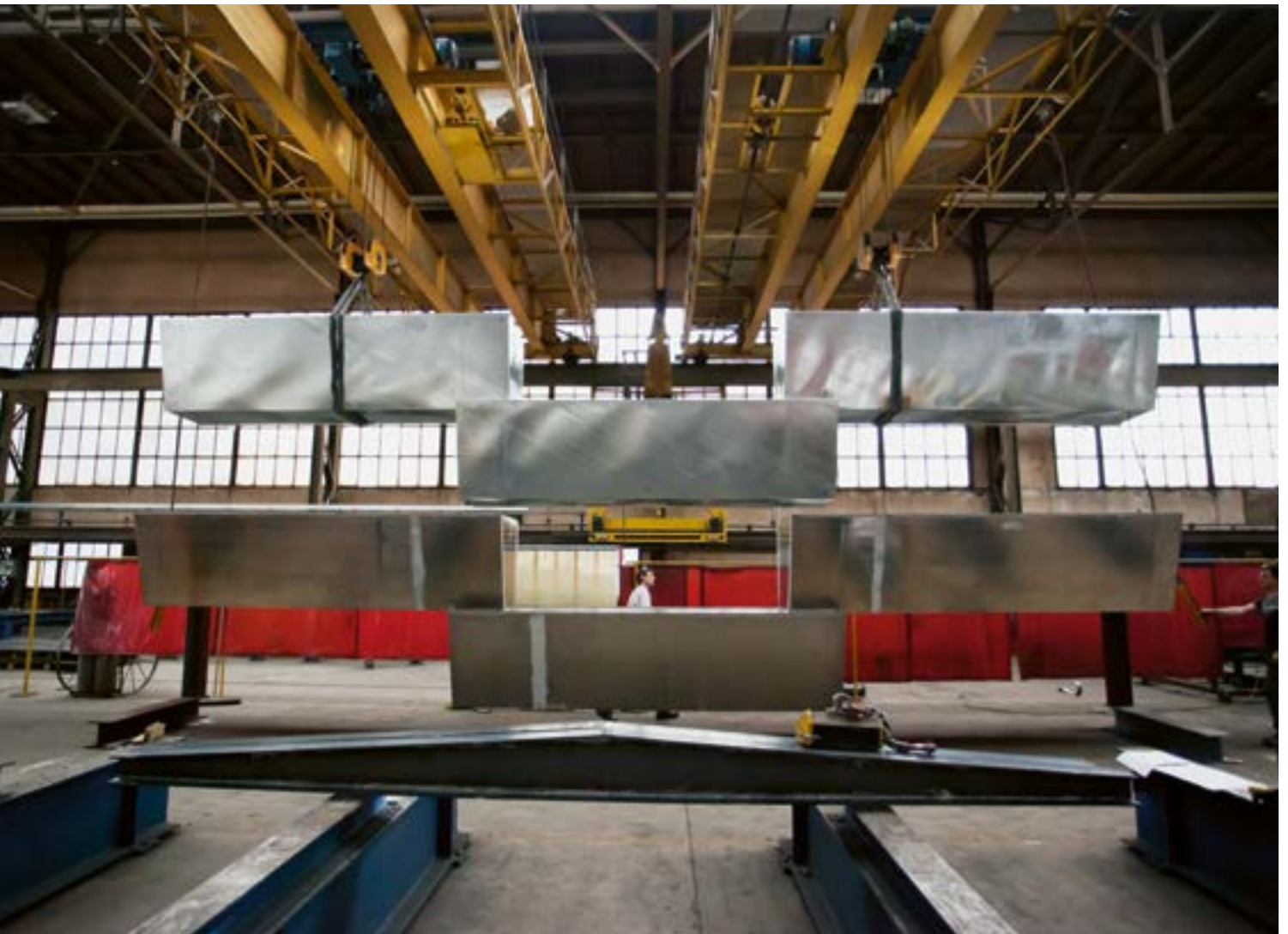
Les éléments porteurs sont pour l'essentiel des HEA, des profils creux de section circulaire ou carrée et des tôles d'acier profilées. Des semi-portiques en poutres treillis d'une portée de plus de 46 m et d'une hauteur



Le bâtiment de l'Amager Resource Center est enveloppé d'une résille en 3D constituée de bacs monumentaux en aluminium, de 1 m de haut, 3,8 m de long et 0,7 m de profondeur. La justesse des proportions confère à l'ensemble une grande finesse, en dépit du volume imposant du bâtiment.



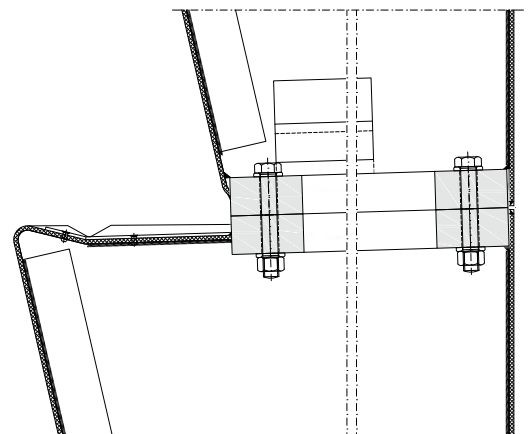
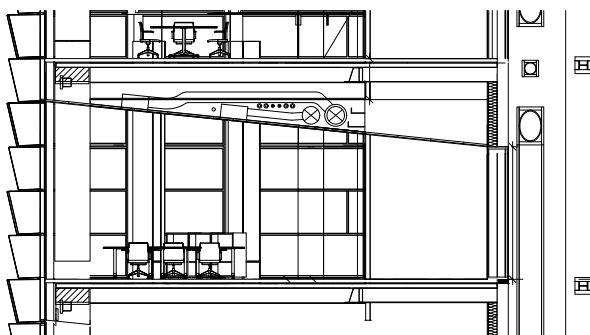
Espaces fonctionnels à l'intérieur de l'usine de valorisation.	4 Administration	11 Circuit d'évacuation des poussières	17 Chaudière	23 Fosse de réception	28 Pompes/condenseurs
	5 Café	12 Salle des turbines	18 Four	24 Récupération des mâchefers	29 Traitement des effluents/eaux de condensation
	6 Colonne de lavage	13 Turbine	19 Ventilateur d'air primaire	25 Stockage des cendres	30 Pompes à chaleur
1 Cheminée	7 MT-ECO	14 Pompe alimentaire	20 Trémie	26 Grille	31 Epuration des fumées
2 Conduite de fumées	8 Denox SCR	15 Evacuation	21 Grappin	27 Evacuation des mâchefers	
3 Espace visiteurs	9 Espace visiteurs	16 Ventilateur d'air primaire	22 Réception		
	10 Electrofiltre				



Haut : fabrication d'un élément de façade chez Tuschmid, à Frauenfeld.

Gauche : au regard des tuyauteries et de la charpente métallique du bâtiment, les éléments de façade paraissent bel et bien d'une remarquable finesse, en dépit de leurs grandes dimensions (voir également photo ci-dessus).

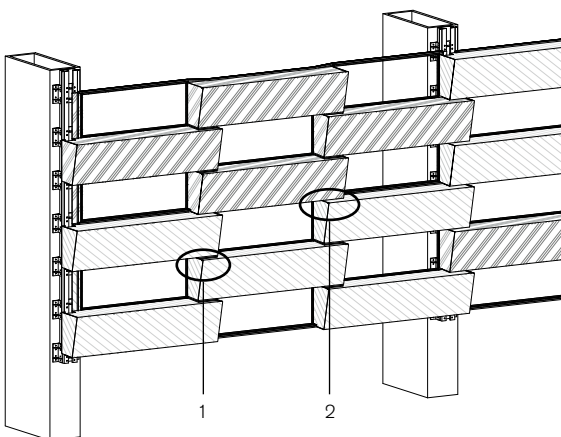
Droite : détail de deux bacs, assemblés par boulonnage, avec un système de brides analogues aux brides de tuyaux, mais retournées vers l'intérieur, échelle 1:8.



statique allant jusqu'à 5 m enjambent la halle de réception. La fosse de réception est franchie par des poutres treillis de 40 m de long. Au-dessus de la halle principale, les poutres treillis ont une portée de 60 m et une hauteur allant jusqu'à 4 m. Elles reposent sur des profilés reconstitués soudés de 500 ou 750 mm × 1000 mm ou 1600 mm. Les poteaux sont disposés tous les 10 m en façade et atteignent jusqu'à 61 m de hauteur. Ils constituent les seuls éléments reprenant les efforts horizontaux et verticaux dans le plan de la façade. Un espacement plus réduit n'était pas possible : il aurait été incompatible avec le cheminement des réseaux. Le volume du bâtiment a été optimisé de telle sorte qu'il ne laisse pratiquement pas d'espace libre autour de la machinerie.

Effet de profondeur pour surfaces planes

Alors que la structure porteuse se conforme à la géométrie du bâtiment et s'adapte à ses différentes fonctions, l'enveloppe donne à l'ensemble une parfaite unité d'aspect. Selon les parties du bâtiment concernées, cette enveloppe remplit des fonctions différentes : isoler, enfermer, s'ouvrir, envelopper, assurer l'étanchéité. Pourtant, sa peau extérieure, qui évoque un claustra en briques voire un tapis antidérapant à reliefs, est uniforme sur l'ensemble des 30000 m² de sa surface. On imagine des fiches en acier maintenant de larges bandes tressées, formant ainsi une résille, certes rigide, mais suffisamment déformable pour épouser étroitement le volume. En fait, c'est l'échelle démesurée du bâtiment qui donne l'impression de finesse. Dans la réalité, les fiches sont de gros poteaux et les bandes d'énormes assemblages de caissons dégageant de vastes ouvertures de 2,8 × 1 m.



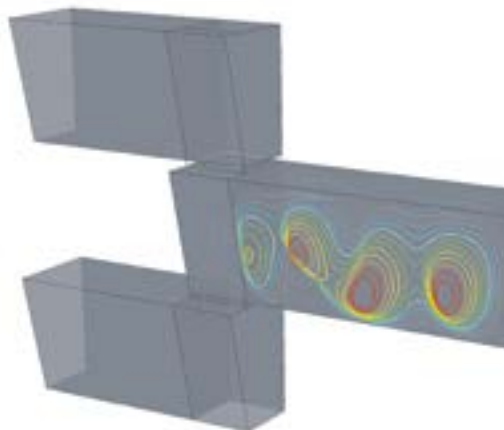
Intégration des fonctions plutôt que superposition des fonctions

A l'origine, la façade devait avoir une profondeur de 1 m et être constituée par la superposition classique de couches fonctionnelles et structurales. Mais cette solution pêchait par un manque d'homogénéité et, surtout, de rigueur technique. Le bureau d'études Lüchinger + Mayer a donc élaboré une solution constructive qui tire parti des synergies entre les différentes composantes et différentes couches d'une façade. Les ingénieurs se sont écartés du principe classique consistant à séparer la fonction protectrice de la fonction porteuse, donnant une fonction porteuse à la peau extérieure. De la sorte, l'ossature secondaire qui aurait été nécessaire, en plus de l'ossature primaire, pour porter les bacs – les « briques » – devenait inutile.

Chaque « brique » est constituée d'un caisson soudé rigide, de 1 m de haut, 3,8 m de long et 0,75 m de profondeur. Les ingénieurs ont repris les dimensions et les formes que leur imposait l'architecture et les ont exploitées structurellement. Ce choix de ne pas séparer les fonctions du système de façade s'est révélé avantageux à la fois du point de vue de la statique et de celui de l'architecture. En fin de compte, architecture et structure se déterminent l'une l'autre.

Une structure composée de « briques »

Les bacs, dont la longueur est ajustée à la trame de la charpente métallique à l'intérieur du bâtiment, s'assemblent avec précision. Ils sont regroupés par ensembles symétriques de quatre ou cinq, soudés ou assemblés par boulonnage sur trois rangs. L'élément constitué de cinq bacs forme une sorte de H, que l'on assemble par soudage aux éléments à quatre bacs (voir figure en bas à gauche). Chaque ensemble combiné repose sur les poteaux, formant au fond un système



Gauche : les éléments de façade livrés sont constitués de plusieurs bacs ou « briques ». Un élément ainsi composé correspond au système statique d'une poutre sur appuis simples entre poteaux, avec une portée de 10 m.

- 1 Assemblage soudé ou boulonné
- 2 Pas d'assemblage ; permet le rachat des tolérances/dilatations

Droite : analyses non linéaires de stabilité intégrant le voilement.



La charpente métallique à l'intérieur de l'Amager Resource Center à Copenhague.

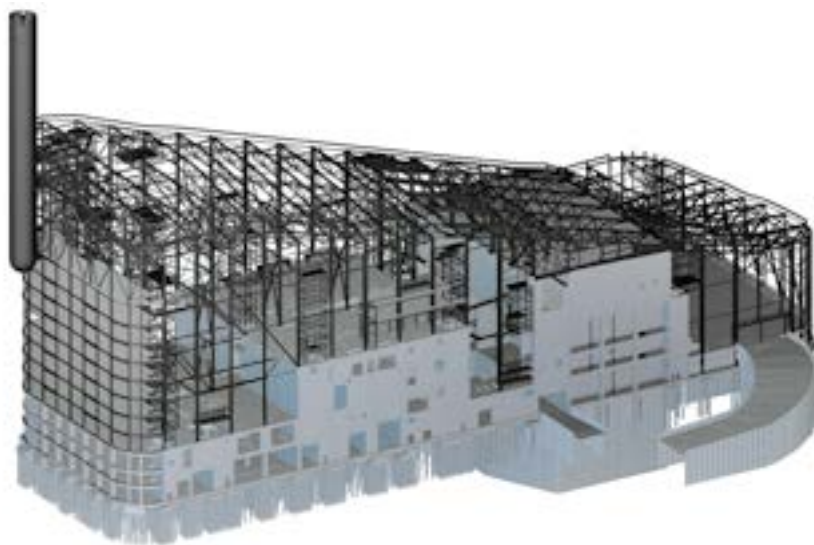
En arrière-plan, on reconnaît la façade, avec ses bacs entre les poteaux. Côté intérieur, leur surface est plane, pour éviter l'accumulation de poussières.

statique assimilable à une poutre sur appuis simples. La symétrie des assemblages permet d'éviter les efforts de torsion qui seraient apparus si les bacs avaient été regroupés en ensembles asymétriques. L'environnement marin du détroit de l'Öresund a conduit à dimensionner les éléments de façade pour des efforts de vent pouvant dépasser 3 kN/m^2 et à retenir une classe de corrosion C4. Avec leur protection anticorrosion, ils doivent pouvoir rester exempts de tout entretien pendant une durée de 50 ans.

Des bacs à parois minces

Les matériaux et les détails constructifs ont été soigneusement étudiés par le bureau d'études Dr. Lüchinger + Meyer, en collaboration avec le cabinet d'architectes BIG. Faisabilité, nature des matériaux, qualité de surface, protection anticorrosion, tolérances et délais de galvanisation ont été étudiés sur des modèles réduits en aluminium et en acier. Un prototype de la façade, fabriqué par la société Tuchschnid et installé sur le banc d'essai du Centre de compétences façades et de la construction métallique de la Haute Ecole spécialisée de Lucerne, a servi à étudier la capacité portante du système, la résistance au vent, l'étanchéité à l'air et l'étanchéité à l'eau.

Le dimensionnement et le choix des matériaux ont été dictés à la fois par des impératifs de production et de transport et par la consommation de matière, qu'il s'agissait d'optimiser. Une réduction de l'épaisseur des tôles de 0,5 mm seulement se traduit par une économie de 50 tonnes d'aluminium ou de 140 tonnes d'acier : on voit la pertinence d'un dimensionnement précis ! Le bureau d'études est en fait parvenu à une réduction significative des épaisseurs, passant des 7 mm calculés initialement à 5,5 mm voire, localement, 4,5 mm. La flèche des éléments est demeurée faible, la hauteur statique restant inchangée. Mais les tôles risquaient le voilement en raison de leur élancement. De même, les liaisons entre « briques » – assemblages soudés ou boulonnés, selon le cas – qui transmettent les efforts des éléments intermédiaires aux éléments d'extrémité sont fortement sollicitées. L'utilisation experte de modélisations par éléments finis et leur familiarité avec les calculs non-linéaires ont permis aux ingénieurs d'optimiser les épaisseurs de tôles, moyennant l'usage de raidisseurs au droit des zones chargées, et d'obtenir une construction stable en dépit de son élancement.



Projet Amager Resource Center
Lieu Copenhague
Maître de l'ouvrage Amagerforbrændingen, Danemark (ARC I/S Amager Resource Center)
Architectes BIG – Bjarke Ingels Group, Copenhague
Structure porteuse MOE, Danemark
Etude des façades, de l'avant-projet jusqu'à l'appel d'offres Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieure
Etude des façades – prototype Tuchschild, Frauenfeld
Essais des façades Kompetenzzentrum Fassaden- und Metallbau, HSLU
Essais de corrosion Empa Dübendorf, Zurich
Entreprise de construction métallique Züblin Stahlbau GmbH
Principe de construction Portiques acier
Etude d'exécution/production des façades Sipral, Prague
Constitution des façades 25 000 m² panneaux sandwichs acier enveloppe extérieure en caissons aluminium
Nuances d'acier S355 et S460 pour la charpente métallique principale et S235 pour la charpente métallique secondaire
Tonnage 7500 t acier
Système porteur Poutres, poteaux et fermes en treillis de profils variable
Volume 41 000 m³
Usage Valorisation énergétique des déchets ménagers, installation sportive (toiture)
Coût des façades 25 mio. fr.
Durée des études 2011–2014
Durée des travaux (gros-œuvre) 2015–2016
Achèvement gros-œuvre 2016
Protection incendie et/ou protection anticorrosion Matériau brut
Performance énergétique / développement durable LEK 2015

Matériau et traitement de surface

Le choix du matériau des bacs est resté ouvert pendant toute la phase des études, jusqu'au moment de l'estimation. Il s'agissait de pouvoir répondre de façon optimale aux contraintes spécifiques du projet. Pour des raisons de performance structurale, l'équipe de concepteurs préférait l'acier. Acier galvanisé, acier Corten, peint ou non, ont été envisagés et comparés quant à leur durabilité. L'analyse et les essais sur échantillons ont confirmé que les exigences ne pouvaient guère être satisfaites par exemple par une galvanisation au trempé avec une couche de zinc de 150 µm obtenue dans un délai raisonnable. Les chants découpés au laser auraient nécessité une opération de nettoyage avant galvanisation. Il aurait en outre fallu assurer la continuité de tous les cordons de soudure. Des études ont donc été menées pour l'aluminium. Une analyse a montré qu'en intégrant toutes les opérations de préparation, de post-traitement et d'entretien nécessitées par l'acier, l'aluminium laissé brut était financièrement plus attractif, même s'il est plus cher du strict point de vue du coût de la matière.

La forme des bacs et le pliage des tôles ont été optimisés en fonction de la largeur des bobines (2,6 m), dans un processus itératif avec l'entreprise Hydro-

Aluminium de Grevenbroich. Ainsi, un bac est constitué de seulement deux tôles, ce qui a permis d'éviter des soudures nombreuses et coûteuses. Les tôles, pliées, présentent un retour incliné qui permet l'écoulement de la pluie tout en retenant la neige (voir détail p. 18). La forme des bacs répond par ailleurs aux exigences fonctionnelles spécifiques qui leur sont imposées, sans incidence sur les exigences structurales.

L'ingénierie en appui à l'architecture

Les calculs de forme et d'épaisseur de tôle ont permis de réaliser des éléments de façade intégrant toutes les composantes nécessaires pour satisfaire aux exigences fonctionnelles, pouvant être transportés par semi-remorque et s'ajustant à quelques millimètres près dans la façade. Ils satisfont à la fois des exigences structurales et thermiques. Le système de façade – et chaque élément qui le compose – intègre à la fois une fonction statique et une fonction protectrice, assurées de manière robuste mais aussi économique. En intégrant ainsi les propriétés des différentes couches composant habituellement les façades, le système génère une plus-value appréciable. Le projet architectural s'en trouve renforcé, en même temps que la construction atteint une cohérence visuelle, technique et statique.

Vue sud-ouest du modèle 3D de l'infrastructure (béton – en gris) et de la superstructure (acier – en noir) par le bureau d'études MOE. La structure porteuse est constituée de plusieurs tonnes d'acier qui définissent la forme complexe de l'usine et supportent la façade végétalisée – un plus pour l'ambiance intérieure – et la toiture en pente.

Impressum

steeldoc 03/17, septembre 2017

Ouvrages d'exception

Editeur :

SZS Centre suisse de la construction métallique, Zurich
Patric Fischli-Boson

Rédaction et textes :

espazium – Les éditions pour la culture du bâti, Zurich
Judith Solt

Franziska Quandt

Clementine Hegner-van Rooden, p. 4–9

Jacques Perret, p. 10–15

Clementine Hegner-van Rooden, p. 16–21

Clementine Hegner-van Rooden et

Franziska Quandt, p. 22–26

Christof Rostert, secrétaire de rédaction

Traduction allemand–français :

Chantal Pradines, Michel Crisinel

Traduction français–allemand :

Anna Friedrich

Textes basés sur les informations des concepteurs.

Les informations et les plans ont été fournis par
les bureaux d'études.

Mise en page :

espazium – Les éditions pour la culture du bâti, Zurich
Claudia Hodel, Anna-Lena Walther

Photos :

Titre : Michael Zimmermann

Editorial : Oliver Heissner

p. 5 Iwan Baan

p. 6, 8 Oliver Heissner

p. 11–15 Ingeni, Genève

p. 17, 20 Christoffer Reglid

p. 18 Dr. Lüchinger & Meyer

p. 23, 24 Jo Pesendorfer

p. 25 Dietmar Feichtinger Architectes,

Thomas Jouanneau

Graphique p. 26 Projet du Mont Saint-Michel

Conception graphique :

Gabriele Fackler, Reflexivity AG, Zurich

Impression :

Stämpfli SA, Berne

ISSN 0255-3104

Abonnement annuel CHF 60.– / étranger CHF 90.–

Numéros isolés CHF 18.– / numéros doubles CHF 30.–

Sous réserve de changement de prix.

A commander sur www.szs.ch/steeldoc/

Construire en acier/steeldoc® est la documentation d'architecture du Centre suisse de la construction métallique et paraît quatre fois par an en allemand et en français. Les membres du SZS reçoivent l'abonnement ainsi que les renseignements techniques du SZS gratuitement.

Toute publication des ouvrages implique l'accord des architectes, le droit d'auteur des photos est réservé aux photographes. La reproduction et la traduction, même partielles, de cette édition ne sont possibles qu'avec l'autorisation écrite de l'éditeur et l'indication de la source.

Abonnement annuel à steeldoc pour CHF 60.–

(gratuit pour les étudiants) sur www.szs.ch/steeldoc/