



Developpement durable  
Démodulor, une démarche  
de mixité des matériaux  
pour favoriser la démontabilité

Sur le terrain  
Nouveau hall d'exposition au  
Bourget  
Un origami d'acier

Rencontre  
Philippe Ascone, PDG d'Alkar



**DOSSIER**  
Les formations  
au CTICM



# TERRAIN TERRAIN

Nouveau hall d'exposition au Bourget

## Un origami d'acier

La commande était simple : un hangar de 1 800 m<sup>2</sup> pour abriter quelques avions symboles de la seconde guerre mondiale. La réponse sera structurelle : huit portiques effilés en acier brun enveloppés d'un bardage gris métal.

L'architecture de ce projet ne s'arrête pas à la définition d'une forme globale : elle est présente dans le dessin même de sa charpente, dans chacun des plis de l'acier, dans tous les détails d'assemblage de cet origami de métal. L'ensemble paraît léger, aérien, il semble presque prêt à s'envoler dans le ciel du Bourget...

Vincent Rey





©Hélène Peter

## Une aile d'acier

Le 12 juin dernier, un nouveau bâtiment est inauguré au Musée de l'air et de l'espace du Bourget : le Hall 39-45 destiné à exposer les avions de la seconde guerre mondiale, les « warbirds ». Il a été édifié grâce au mécénat de la fondation David H. Dewhurst en souvenir du lieutenant-colonel David Dewhurst, Jr., pilote de l'armée de l'air américaine durant le conflit. Il abrite quelques merveilles de l'aéronautique du milieu du XX<sup>e</sup> siècle : Spitfire, Mustang, Skyraider ou encore Dakota.

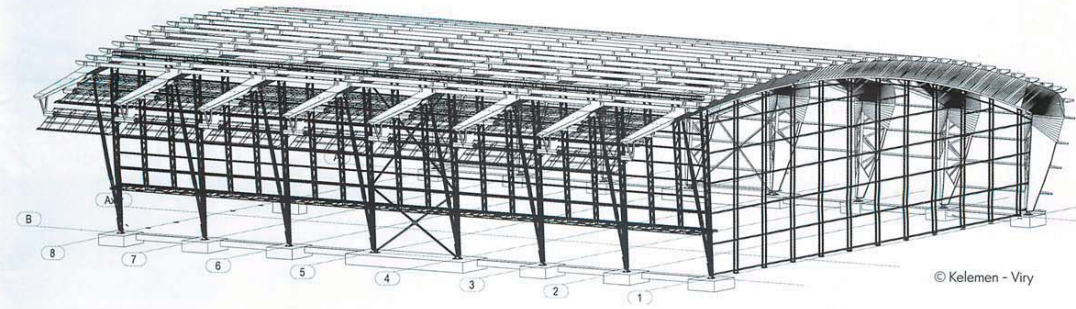
L'architecture de ce nouveau bâtiment contraste fortement avec les formes conventionnelles des hangars présents sur le site. Il développe en coupe un profil tendu, inspiré des ailes d'avion, et s'ouvre sur le tarmac de l'aéroport du Bourget par une immense façade vitrée. Son aspect aérodynamique est renforcé par une série d'étranges appendices suspendus : il s'agit de 21 brise-soleils dont le design est directement influencé par les volets mobiles des avions, les « flaps ».

Un bardage gris acier vient épouser le profil en courbe de cette nouvelle construction. L'ensemble du projet détonne, surprend dans l'environnement du Musée. Jusqu' alors, seules les formes profilées des différents aéronefs exposés venaient s'opposer à la rigidité de la géométrie des halls d'exposition. Les contraintes de l'air et de l'espace ne sont pas celles de la terre et du sol ! Mais ce nouveau hall tente une synthèse improbable : comment faire se rencontrer des univers aussi différents que l'aéronautique et la construction de bâtiments ? La réponse sera structurelle et architecturale.

## La genèse du projet

Mars 2014 : Nicolas Kelemen, l'architecte du projet, signe son marché de maîtrise d'œuvre. Le bâtiment est à livrer impérativement au mois de mai 2015 afin d'être inauguré et ouvert au public pour le salon du Bourget en juin. Il n'a que 14 mois pour réaliser ce nouveau hall, 14 mois pour concevoir le projet, obtenir un permis de construire E.R.P. (établissements recevant du public), finaliser l'ensemble des éléments techniques avec son bureau d'étude STEBAT, réaliser le dossier de consultation des entreprises, lancer l'appel d'offres public, négocier les marchés, mettre au point avec l'entreprise les documents d'exécution, et enfin construire l'ouvrage et le réceptionner.

Le délai est contraint, le budget limité (un peu plus d'un million d'euros pour une surface couverte de près de 1 800 m<sup>2</sup>), ce n'est pas un projet simple. « Si cela était à refaire, je ne sais pas si je m'engagerais à



© Kelemen - Viry

nouveau sur une telle opération avec des délais aussi courts» confie Nicolas Kelemen. Cet aveu témoigne d'une genèse complexe et délicate du bâtiment, mais il est clairement contredit par l'enthousiasme et la fierté de l'architecte quand il évoque son projet !

En un mois, Nicolas Kelemen achève l'esquisse du bâtiment. Sa réflexion procède tout d'abord d'une approche « urbaine » du site. Urbaine, si le mot paraît incongru dans cet environnement aéroportuaire, il est cependant juste. L'urbanité, c'est la prise en compte du contexte, c'est l'attention portée aux éléments en présence. Le futur bâtiment vient dans l'alignement du Hall Concorde et donne directement sur le tarmac. Derrière eux, une série de hangars où sont exposés hélicoptères et avions. Ces différentes constructions viennent créer une sorte de rue, un passage dans lequel transite la majorité des visiteurs. La volonté de l'architecte est claire : il s'agit du plus grand aéroport d'affaires d'Europe et il est donc nécessaire que son projet s'ouvre pleinement sur les pistes, sur le tarmac, sur le spectacle des avions.

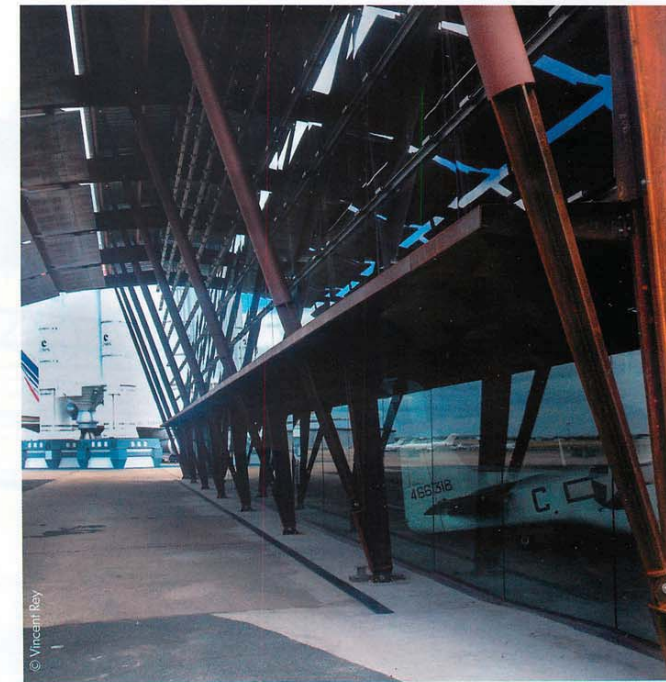
Transparence, le mot est jeté. Le bâtiment doit être transparent, donner en spectacle les pistes du Bourget. Cette transparence se traduit par la volonté de créer une façade totalement vitrée à l'ouest, et côté est, par la présence de « failles », de grandes ouvertures permettant depuis la rue intérieure d'apercevoir les pistes à travers toute la construction.

« L'architecture du Hall doit raconter une histoire, l'histoire de ce musée et des collections qui y sont présentées » déclare Nicolas Kelemen. Il connaît bien la seconde guerre mondiale : son agence a déjà réalisé différents projets en relation à cette période, notamment le centre d'interprétation d'Omaha Beach et le musée du débarquement de Utah Beach.

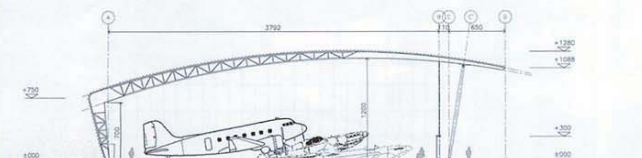
Il va donc puiser son inspiration dans l'architecture des hangars qu'édifiaient les forces alliées au fur et à mesure de leur avancée sur le front. Dès le lendemain du débarquement, les Américains construisaient leurs premiers aéroports. En l'espace

d'une journée, des hangars opérationnels faits de métal et de toile étaient montés. Nicolas Kelemen juge qu'il y a là une leçon d'efficacité architecturale à retenir. Il va s'inspirer de ces constructions pour imaginer une structure tridimensionnelle alliant légèreté et dynamisme.

Très vite, l'architecte dessine le croquis du hall : on y voit un bâtiment ouvert, dissymétrique, une coupe en forme d'aile rappelant l'univers aéronautique. On distingue déjà sur son dessin les portiques effilés, les proportions sont présentes, le projet est lancé !



© Vincent Ray



© Kelemen - Viry



# TERRAIN

## Économie du matériau

Une matière : l'acier autopatinable. Un principe : une architecture légère et transparente. Une envie : des portiques tridimensionnels en treillis soudés. Le travail de conception de la structure peut débiter. Nicolas Kelemen a l'habitude des constructions métalliques, mais compte tenu de la complexité de l'ouvrage, il fait appel à Jean-Christophe Grosso, ingénieur consultant. Ensemble, devant l'écran d'ordinateur, ils dessinent les portiques, sculptent leurs formes, imaginent les plis d'acier nécessaires, les assemblages du métal. « Il y a eu un calcul optimal de la structure, dans l'idée d'un rapport poids-performance le plus efficace possible » indique l'architecte. Le challenge est de taille : ces portiques ont une portée de près de quarante mètres et reposent sur trois fixations articulées. Ne garder que l'essentiel, le minimum de matière possible, tel est la contrainte, le défi que s'est fixé Nicolas Kelemen.

« C'est aussi une question environnementale » confie l'architecte : il faut être économe du matériau, n'utiliser que le strict minimum, éviter tout surdimensionnement. C'est pour cette raison que



© Hélène Peter

Nicolas Kelemen ne travaille pas avec les profils reconstitués soudés. Pour lui, l'utilisation des PRS reflète tout à la fois une standardisation des modes d'assemblages, une perte de savoir-faire, mais surtout un gaspillage de matière : « il y a souvent dans les projets un pourcentage très important d'acier qui est inutile structurellement ».

Le même souci écologique a présidé au choix de l'acier autopatinable. Il y avait certes l'aspect brut du métal que souhaitait l'architecte, mais surtout cela permet d'éviter tous traitements ultérieurs de la

structure : « ce coût environnemental n'est que très rarement pris en compte, de même que la dépense de matière superflue n'est jamais réellement évaluée ».

## Une architecture de métal... et de bois

Le dessin des portiques avance : une poutre treillis composée de trois « V » en métal plié et d'entretoises soudées. La section des portiques est l'exact reflet des contraintes structurelles : épaisse au niveau de sa base et de sa grande courbure, elle vient s'affiner côté tarmac. Certaines charges sont néanmoins trop importantes pour rester en treillis soudés : Nicolas Kelemen et Jean-Christophe Grosso optent alors pour un caissonnage partiel des portiques uniquement aux endroits où cela est nécessaire. Encore une fois, éviter tout superflu !

Les délais de l'opération étant très courts, un travail itératif est rapidement engagé avec le bureau d'étude STEBAT. « L'architecture de ce bâtiment, c'est sa structure. Toute la difficulté de cette opération était de respecter les proportions des portiques » déclare Philippe Noiray, chargé du projet au sein du bureau d'étude. Une des principales contraintes était la problématique du soulèvement au vent. Les premiers calculs de pré-dimensionnement sont effectués, les résultats donnent une flèche dépassant les valeurs recommandées. L'Eurocode 3 spécifie cependant qu'un accord entre maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre permet de s'abstenir des valeurs standards, en relation aux spécificités techniques du bâtiment. Ce sera le cas pour le projet du Hall. « On est ici très loin, en terme de calcul, d'un hangar basique » rajoute Philippe Noiray.

Métal et bois. Nicolas Kelemen souhaitait dès le départ associer ces deux matériaux : « l'idée était de raconter une histoire avec la structure ». L'histoire des premiers avions et de leurs modes de construction, la recherche permanente d'une synthèse entre légèreté et solidité. Nous sommes ici très éloignés des standards et contraintes des constructions terrestres !



© Hélène Peter



© Viry

## Entretien avec Jean-Pierre Tahay, directeur général de l'entreprise Viry.

Qu'est-ce qui vous a motivé à répondre à l'appel d'offres du Hall 39-45 ? Ce qui nous a d'abord intéressés était le matériau employé, l'acier autopatinable. Si l'on retrouve cet acier très souvent en parement et en habillage, il est assez peu utilisé en structure. Nous avons construit récemment deux passerelles piétonnes en acier autopatinable, mais c'est la première fois que l'on réalise un bâtiment avec une structure de ce type.

Le concept, l'approche particulière développée par Nicolas Kelemen nous a également séduits. Il a imaginé des poutres treillis tridimensionnelles avec des solutions « pliées » qui minimisent le travail de découpe et d'assemblage en soudure.

Nous nous sommes posé la question : « comment peut-on faire pour respecter l'idée du projet, tout en la rendant technologiquement réalisable ? ». Cette problématique est essentielle dans les ouvrages architecturaux. Il faut comprendre l'architecture, le concept, et non pas tenter à tout prix d'utiliser les outils que nous avons à notre disposition pour faire différemment, pour altérer l'architecture et ses solutions techniques initiales.

### Et les principales difficultés inhérentes à votre réponse ?

Dans ce type de projet, la principale difficulté est l'évaluation du temps de travail. Le calcul de la quantité de matière première nécessaire à la structure est, lui, relativement simple.

Ce projet était un prototype, quelque chose que nous n'avions jamais réalisé auparavant. Comme nous étions dans le cadre d'un appel d'offres public, il fallait s'engager sur un prix forfaitaire. Nous devions donc évaluer de manière très précise la valeur ajoutée en terme de main-d'œuvre, c'était là que résidait toute la complexité de l'étude de prix.

### Quels étaient les défis techniques posés par cet ouvrage ?

Dans le projet de Nicolas Kelemen, il y avait certaines parties en tôles pliées qui nécessitaient un façonnage assez sophistiqué. Il nous fallait investir dans une forme pliée complexe pour pouvoir bénéficier d'un assemblage qui, au final, soit le plus simple possible, le plus élégant. Nous devions donc imaginer de nouveaux moyens de production pour pouvoir réaliser ce qui était demandé. Concernant la forme particulière des portiques, il nous a fallu réfléchir en amont avec le cintreur, puis inventer un outillage spécifique pour créer leurs profils. Notre valeur ajoutée a été de compléter le dispositif prévu par l'architecte par des éléments additionnels qui ont rendu possible la réalisation de la structure. C'est ici que réside le « plus » que peut apporter l'entreprise par rapport à l'idée initiale : il faut respecter le concept et le développer jusqu'au bout. ▶



► Pour la structure de ce bâtiment, Nicolas Kelemen a parlé de « chaudronnerie »... Il y a effectivement certaines parties de l'ouvrage qui se rapprochent de la chaudronnerie. Les portiques sont composés d'une partie en treillis soudés : c'est de l'assemblage classique de charpente métallique. Par contre, leurs deux extrémités sont en tôles planes et cela rappelle, en raison de leurs formes tout à la fois cintrées et fermées, les coques de bateaux. Nous sommes ici dans un travail de métallerie presque navale, qui nécessite le savoir-faire du chaudronnier. Ce qui est intéressant, c'est que l'on retrouve le métier initial de Viry qui, précisément, nous avait permis de réaliser des bateaux sur la Seine il y a quelques années. C'est comme une sorte de retour aux sources.

**Vous aviez également le lot menuiseries extérieures ?**  
 Nous avons tous les lots sur ce chantier, à l'exception de la couverture et de l'électricité : la structure métallique, le vitrage, les pannes en bois, les fondations. Pour les vitrages, l'idée était de minimiser les pièces d'attache de telle sorte qu'ils soient le plus indépendants possibles de la structure. Nous avons travaillé sur un système de tuilage, avec des verres posés en « écaille ». Les vitrages sont tenus au final avec très peu de métal, par des « pinces » ponctuelles, ce qui augmente la transparence de la façade.

**Comment s'est déroulé le chantier ?**  
 Sur le chantier, la principale difficulté a été le délai très contraint d'exécution. Nous avons signé le marché en décembre pour un début de fabrication en janvier. C'est très court pour un ouvrage de ce type. Nous avons dû organiser de manière condensée la production en atelier.

Il y a eu également des difficultés avec le transport. Les portiques étaient découpés en trois parties, mais les plus grandes pièces faisaient plus de 25 mètres de long ! Nous devions donc les acheminer par transport exceptionnel, mais nous le temps d'obtention des autorisations administratives a été anormalement long : le délai normal est de quatre semaines et, dans les faits, nous avons obtenu les autorisations au bout de dix semaines. Finalement, c'est une question externe à l'entreprise qui a représenté un des plus grands freins à notre projet.

Une fois que le chantier a été lancé, il n'y a pas eu de problème majeur dans la mise en œuvre. Nous avons prévu un assemblage des éléments sur place avec des gabarits spécialement conçus : il fallait absolument garantir la géométrie des portiques avant le levage. Ensuite, nous avons monté la structure, portique par portique.

**Et pour finir, comment se sont passés vos échanges avec l'architecte ?**  
 Il y a eu un véritable dialogue avec Nicolas Kelemen. Nous avons travaillé avec un architecte qui comprenait vraiment la problématique technique, ce qui est extrêmement agréable ! Il avait des idées très précises mais est resté disponible pour examiner toutes nos propositions : s'il y avait une difficulté technique à réaliser une pièce, il était ouvert aux modifications nécessaires. L'ensemble du travail a été très efficace : nous avions un délai contraint en termes d'étude et de chantier, il fallait ne pas perdre de temps. Il y a eu globalement peu d'allers-retours, nous avons été très vite à l'essentiel pour pouvoir réaliser cet ouvrage dans les délais impartis.

Pour l'ossature secondaire du Hall, le choix est donc établi d'utiliser le bois. L'ensemble des pannes du projet, destinées à fixer la peau extérieure, sont réalisées en lamellé-collé. L'association de l'acier autopatinable, de couleur ocre-brune, et des pièces de bois est d'une grande élégance, une réussite esthétique.

Pour la vêtue extérieure, le choix initial de l'architecte était une couverture d'aspect aluminium, encore une référence à l'histoire de l'aéronautique. Mais l'enveloppe budgétaire du projet imposait de faire des choix, et le surcoût engendré par une vêtue de ce type était trop important. Des bacs acier de couleur grise seront donc utilisés. Ils viennent épouser la forme courbe et tendue du bâtiment, soulignent son aspect dynamique.

**Une façade ouverte sur le tarmac**  
 L'autre singularité de ce hall, c'est sa façade ouest ouverte sur les pistes de l'aéroport. « Je voulais une façade totalement vitrée avec un porche qui invite vers l'extérieur, qui s'ouvre sur le tarmac » déclare Nicolas Kelemen.

Sur toute la longueur du bâtiment, en partie basse, de grands vitrages continus sont surmontés d'une casquette d'acier. L'effet est réussi : une véritable sensation de transparence et une vue immense sur les pistes du Bourget. En partie haute, l'architecte a opté pour un système de « tuilage » : les vitrages sont fixés en écailles par un système de pinces métalliques. L'ensemble de la façade vitrée est indépendante des portiques, comme suspendue.

Absents de ses premières esquisses, Nicolas Kelemen a souhaité ajouter en cours de projet une série de brise-soleils sur la façade ouest. Pour des raisons économiques, l'architecte se tourne tout d'abord vers des éléments standards, en aluminium. Mais rapidement, il se rend compte qu'il ne dispose pas d'un budget suffisant. Il change alors de stratégie, et tente de réaliser ces appendices en acier autopatinable, à l'instar des portiques.

Nicolas Kelemen confie avoir toujours été fasciné par les « flaps », ces volets articulés situés à l'arrière des ailes d'avion. Il s'inspire directement de leur design pour dessiner des brise-soleils composés de trois parties, et venant s'inscrire dans l'exacte géométrie de la courbure du bâtiment. L'effet est totalement réussi : vu du sol, ils semblent prêts à s'incliner et à se mouvoir à l'image de leurs homologues aéronautiques.

Composés de caissons creux en acier, équipés de raidisseurs, ces brise-soleils seront réalisés par l'entreprise Viry.

**Un appel d'offres complexe**  
 L'appel d'offres de l'opération est lancé à la fin du mois de juin pour des propositions attendues en septembre. « Peu d'entreprises avaient les compétences pour répondre » reconnaît Nicolas Kelemen. La problématique était effectivement complexe : des sociétés spécialisées dans la construction navale, des chaudronniers, avaient été consultés. « Trop simple » avaient-elles répondu ! Et beaucoup de charpentiers français interrogés avaient, eux, jugé le projet trop complexe.

Seules quelques entreprises répondent à la consultation, dont la société Viry. « Viry avait, dès l'appel d'offres, compris les enjeux du projet » déclare l'architecte. Mais l'analyse des premières réponses donne un coût global dépassant l'enveloppe budgétaire initiale. Il faut donc travailler à nouveau le projet et renégocier les offres. Cette période durera deux mois. En décembre, les marchés sont signés. L'entreprise Viry obtient l'ensemble des lots à l'exception de l'électricité et de la couverture. Les délais sont extrêmement contraints : la mise au point des documents d'exécution commence début janvier et les premières fondations doivent être coulées aux premiers jours de février pour respecter le planning de l'opération ! Le dialogue entre l'architecte et l'entreprise se déroule bien. La compréhension est mutuelle : « Viry a vraiment joué le jeu » déclare Nicolas Kelemen. Peu de changements au final par rapport au projet initial, avec un regret de l'architecte : « nous aurions pu nous passer des contreventements en croix de Saint-André, mais nous n'avons pas eu le temps d'aller jusqu'au bout de nos calculs ».

Malgré quelques retards dans l'obtention des autorisations de convoi exceptionnel, les portiques arrivent finalement sur le chantier. Ils sont transportés en trois parties, puis assemblés au sol directement sur le site, à l'aide de gabarits. Au mois de mars, les deux premiers éléments centraux sont levés. Une complexité, la flexibilité des portiques : « c'est une structure souple jusqu'à ce qu'elle trouve sa dimension statique » explique l'architecte.

Le chantier avance vite, sans difficultés particulières. Au mois de juin, ce nouveau bâtiment est inauguré. Le musée de l'air et de l'espace peut s'enorgueillir d'une nouvelle architecture, à la hauteur des exceptionnels avions qui y sont exposés. Nicolas Kelemen a rempli son contrat.



**Fiche signalétique**

Maitrise d'ouvrage : Musée de l'air et de l'espace  
 Maitrise d'œuvre : Nicolas Kelemen architecte  
 Consultant structure acier : Jean-Christophe Grosso  
 Bureau d'étude structure : Stebat  
 Entreprise : Viry  
 Surface : 1 733 m<sup>2</sup>  
 Coût des travaux : 1,4 M€  
 Livraison : juin 2015

**Au final...**  
 Il y a une fausse opposition entre un projet « basique et économe » et un projet « sophistiqué et cher » déclare Nicolas Kelemen. Le Hall 39-45 ne sera revenu au final qu'environ 7% plus cher qu'un hangar classique : « on peut sortir du standard sans faire du haut de gamme ». Ce qui importe, selon l'architecte, c'est de rentrer dans la logique de l'acier, comprendre le matériau dans ses qualités et limites. Mais cela n'est vrai, ajoute-t-il, qu'à la condition de trouver une entreprise qui rentre dans le jeu, qui a tout à la fois les capacités et le désir de se lancer dans un projet hors normes. Le Hall 39-45 est exemplaire d'une approche technique et sensible de la problématique structurelle. Et l'élégance de son architecture tient à l'efficacité du dessin de ses portiques. Un véritable origami d'acier.

