

ENSA PARIS-LA-VILLETTTE

ACTIVITÉ & INSTRUMENTATION DE LA CONCEPTION

AIC

Pourquoi optimiser une structure ?

Sous la direction de :

Présenté par :
Robin RAUDRANT

François GUÉNA
Anne TÜSCHER
Joaquim SILVESTRE

9 Janvier 2018



Résumé

Le processus d'optimisation appliqué au design a été défini à la fin des années 1970 dans le domaine de l'ingénierie aéronautique : son objectif est d'aider les concepteurs à choisir la meilleure solution à un problème complexe, principalement à l'aide des outils informatiques.

Depuis, ces outils sont également venus aider la conception architecturale sur des points précis : vérification des métrés, ensoleillement, vent et – celui qui nous intéresse ici - structure.

Si l'équipe d'œuvre, et notamment l'architecte, restent seuls maître de la conception, on peut se demander dans quelle démarche de conception s'inscrit un processus d'optimisation de la structure, ce processus participant également à l'attribution de mesure à l'espace. L'objet de cette étude est donc d'expliquer la mise en place d'un processus d'optimisation de déterminer à quelle(s) échelle(s) de conceptions architecturologiques l'optimisation des structures appartient, son originalité est d'utiliser les concepts et définitions architecturologiques à la conception des structures.

Table des matières

Introduction	4
Pourquoi optimiser ?	4
Comment optimiser ?	4
L'architecturologie comme outil d'analyse	4
Méthodologie	5
Présentation	5
Rappel sur la théorie des structures et de la construction	5
<i>Histoire de la théorie des structures et histoire de la construction</i>	5
<i>Déférence entre vérifier, prédire et optimiser des structures</i>	5
<i>L'optimisation appliquée au design</i>	7
Outil d'analyse : l'architecturologie	8
<i>L'architecturologie, une science de la conception</i>	8
<i>méthode d'analyse architecturologique</i>	8
Protocole de l'étude	8
Analyses des échelles architecturologiques	10
Échelle technique	10
<i>Un exemple : La couverture de la grande cour du British Museum</i>	10
Échelle fonctionnelle	14
<i>Un exemple : Le stade de Melbourne</i>	14
Échelle symbolique dimensionnelle	17
<i>Un exemple : La Sagrada familia</i>	17
Échelle symbolique formelle	18
<i>Un exemple : La cité de l'éducation du Qatar</i>	19
Échelle de voisinage	23
Échelle parcellaire	24
<i>Un exemple : Le pont de BaakenHafen</i>	24
Échelle géographique	26
<i>Un exemple : La passerelle du Mont-Saint-Michel</i>	27
Échelle visibilité	28
Échelle optique	29
Échelle socio-culturelle	30
Échelle de Modèle	31
Échelle sémantique	32
Échelle d'extension	33
Échelle économique	33
<i>Un exemple : Terminal 2B de l'aéroport Charles-de-Gaulle</i>	34
Échelle géométrique	34
<i>Un exemple : la ville-parc insulaire</i>	35
Échelle cartographique	37
Échelle de représentation	38
Échelle de niveau de conception	39
Échelle globale	40
Échelle humaine	40
Conclusions de l'étude	41
Récapitulatif	41
Qu'en déduire ?	41

Glossaire	43
Le vocabulaire de l'architecturologie	43
<i>L'idée</i>	43
<i>La perception</i>	43
<i>L'usage</i>	43
<i>Le système</i>	43
<i>Le discours</i>	43
<i>L'espace architectural</i>	43
<i>Le projet</i>	44
<i>Le processus et la conception</i>	44
<i>L'espace de conception</i>	44
<i>L'espace architecturologique</i>	44
<i>La mesure</i>	44
<i>La référence</i>	44
<i>Le découpage</i>	45
<i>La pertinence</i>	45
<i>La dimension</i>	45
<i>Échelle et Modèle</i>	45
Le vocabulaire de la structure et de l'optimisation	45
<i>Optimisation (mathématique)</i>	45
<i>Singularité (mathématique)</i>	46
<i>algorithme d'optimisation génétique</i>	46
<i>théorie des poutres</i>	46
<i>Surface non développable</i>	46
<i>Optimum local ou global</i>	46
<i>continuité structurelle</i>	47
<i>NURBS</i>	47

Introduction

Pourquoi optimiser ?

Si nous réunissions une infinité d'architectes pour concevoir une passerelle dans un environnement bien défini nous obtiendrions, très probablement, une infinité de réponses différentes. En particulier pour ce projet très simple, chaque architecte aura une idée précise de la structure idéale de son objet : structure métallique en treillis, en arc, en béton armé, suspendue, en bois, etc. Peut-on imaginer un outil pour nous aider à faire le meilleur choix de conception parmi ces structures ?

Rechercher le meilleur : c'est optimiser, du latin *optimus*, superlatif de *bonus*, ce qui est bien. L'optimisation serait donc cet outil. Il reste alors une question : si on optimise une structure pour en obtenir le meilleur, on peut encore se demander ce que signifie obtenir le *meilleur* d'une structure.

Au final : quels éléments de conception poussent les équipes d'œuvre à adopter une démarche d'optimisation pour une structure ?

On a envie de répondre tout de suite à cette question par l'argument économique : nous optimisons pour économiser de la matière donc de l'argent. Hors nous verrons que, bien que la question économique est sous-jacente à bien des optimisations, l'économie du bâtiment est une expertise complexe qui ne peut pas se résumer à moins de matière = moins de coût. La complexité de l'ouvrage et des travaux rentre en compte. *A fortiori*, les structures optimisées sont dans certains cas très complexes à mettre en œuvre, et donc chères. On cherche donc ici à trouver d'autres sources à l'optimisation des structures.

Comment optimiser ?

Le processus d'optimisation appliqué au design a été défini à la fin des années 1970 dans le domaine de l'ingénierie aéronautique et s'appuie sur le développement des outils informatiques : son objectif est d'aider le concepteur à choisir la meilleure solution à un problème complexe. Le processus repose sur la définition de 5 éléments de design : les objectifs, les contraintes, les variables, la forme et le modèle. Cette manière de raisonner arrive à la fin d'une longue histoire de la théorie des structures, elle n'est pas la seule méthode que les ingénieurs ont imaginés pour calculer des structures comme nous le verrons.

L'architecturologie comme outil d'analyse

L'architecturologie, construction scientifique née dans les années 1970 et encore en développement aujourd'hui, a pour objet d'étude le processus de conception architectural, autrement dit : les opérations cognitives suivies lors d'une exercice de conception. Notre sujet étant une approche théorique de la conception, à partir du point de vue très précis de l'optimisation des structures, nous avons décidé d'utiliser ces outils de réflexion.

L'optimisation des structures n'est qu'un outils pour aider l'équipe d'œuvre dans la conception. Son utilisation pour le calcul des structures a souvent été associée à l'économie du projet. Néanmoins ce travail cherche à savoir s'il n'existe pas d'autres raisons à son utilisation. On se demande de quel ordre sont les décisions qui mènent à mettre en place une optimisation de la structure, soit, en termes architecturologiques : à quelle(s) échelle(s) de conceptions architecturologiques l'optimisation des structures appartiendrait.

Méthodologie

Présentation

La présentation de la méthodologie de l'étude suit une logique en trois parties. Son objectif est de présenter clairement les connaissances et outils théoriques que nous utilisons, avant de présenter le protocole d'analyse de l'étude.

- Nous ferons d'abord un rappel sur la théorie des structures, afin de comprendre son évolution et la place qu'y occupe l'optimisation appliquée au design. Nous présenterons la différence fondamentale, pour le travail de calcul de l'ingénieur, entre vérification, prédiction et optimisation des structures.
- Nous développerons ensuite un rappel sur les outils et concepts architecturologiques utiles à l'étude.
- Enfin, dans une dernière partie, nous présenterons le protocole de l'étude.

Rappel sur la théorie des structures et de la construction

Histoire de la théorie des structures et histoire de la construction

L'absence de calculs n'empêche pas de construire une structure stable : il *suffit* de s'attacher au bon sens structurel, au dessin, à la prudence et à l'expérience. C'est très récemment[?] que les innovations structurelles, complexifiant la construction durant l'époque moderne, et la crainte toujours présente de la ruine ont créé le besoin de méthodes de calculs des structures. C'est pourquoi l'histoire de la théorie des structures et l'histoire de la construction sont parallèles mais différentes :

- L'histoire de la construction s'attache aux innovations matérielles dans ce domaine, qu'il s'agisse de matériaux (acier, béton armé, CLT), de mode de production (préfabrication, découpe laser, impressions 3D) ou de mise en œuvre (précontrainte, plancher collaborant, dalle opportune, etc.).
- Alors que l'histoire de la théorie des structures, celle qui nous intéresse ici, s'attache aux innovations intellectuelles dans ce domaine, c'est-à-dire l'évolution des outils de conceptions des structures, qu'il s'agisse de méthodes mathématiques, géométriques où de connaissances sur la physique des matériaux.

L'optimisation arrive à la fin de l'histoire de la théorie des structures. Il s'agit en effet d'une méthode, regroupant un ensemble d'outils encore en évolution aujourd'hui[?], dont l'objectif est d'améliorer la maîtrise de la conception des structures par l'ingénieur.

Différence entre vérifier, prédire et optimiser des structures

La distinction entre les trois méthodes de vérification des structures suit une approche historique et pratique[?]. On remarque en effet que la vérification apparaît dans la première théorie des poutres développée par Galilée, Hook et Newton¹ aux XVIIe et XVIIIe siècles. La prédiction suit alors logiquement au XIXe siècle, une

1. Galilée jette les bases de la théorie des poutres mais se trompe en admettant l'hypothèse que la répartition des contraintes est uniforme dans la section. C'est le travail de Newton sur le calcul intégral et de Hook sur l'élasticité des matériaux qui a permis de modéliser la répartition du champs de contraintes dans la section. C'est à ce moment que la théorie des poutres devient fiables pour le calcul des éléments filaires.

fois les connaissances bien appuyées sur des matériaux normalisés comme la fonte, le fer ou l'acier. C'est très récemment que, les outils informatiques aidant, on a pu développer à grande échelle des algorithmes de comparaison des prédictions, c'est à dire des processus d'optimisation. Un exemple permet de mieux comprendre cela. Prenons une structure quelconque et voyons ce que cela veut dire de la vérifier, la prédire ou l'optimiser :

- Si vous recevez les plans d'une structure dont toutes les informations sont fixées (dimensions, types d'éléments, matériaux) et que vous devez vérifier si elle pourra supporter les efforts qu'on lui applique : vous faites une *vérification*. C'est ce qui arrive souvent lorsque l'on travaille sur de l'existant en réhabilitation : il faut vérifier que la structure peut reprendre les nouveaux efforts auxquels on compte la soumettre. Si ce n'est pas le cas, une structure de renforcement devra être prévue. A noter que l'on peut utiliser également cette méthode dans la conception neuve : si vous utilisez un élément fortement prédimensionné (pour d'autres raisons que structurelles, disons l'acoustique ou alors l'esthétique) vous devrez néanmoins effectuer un calcul de vérification.

Également, lorsqu'un phénomène est mal connu - par exemple les efforts de dilatations thermiques au sein d'une structure - alors on la vérifiera par rapport à ces efforts. La vérification est binaire : ou la structure répond aux efforts et dans ce cas on arrête les recherches, ou elle ne répond pas aux efforts et dans ce cas il faut - le plus souvent - effectuer un calcul de prédition.

- Si vous recevez des plans d'une structures dont une partie des informations sont fixées à l'exception de quelques variables que vous devez déterminer, il s'agit d'une *prédition*. On va faire un modèle auquel on applique les charges et prendre le profil ou la qualité de matériau nécessaire pour reprendre les charges. C'est ce que l'on fait souvent pour le dimensionnement des éléments sans grand enjeu de structure, voile de béton armé, petits éléments de charpente bois, etc. On a déjà une idée de ce qu'on veut trouver et on cherche à prédire l'élément qui peut reprendre les efforts.
Si on a plusieurs solutions au problème et que nous aimerais les comparer selon des critères que l'on se donne, alors il faut réaliser une optimisation.
- Enfin, si vous recevez des plans de structure présentant les principes généraux de construction - en fixant certains d'entre eux - mais laissant libre la comparaison de plusieurs solutions de prédictions selon des critères donnés, c'est alors une optimisation qu'on vous demande.

Ces classifications sont parfois un peu théoriques. Par exemple, en calcul de charpente métallique l'ingénieur fait, en général, une prédition ; il dimensionne pour connaître quel profil métallique peut répondre au problème. Il est vrai que, le résultat obtenu, il y a souvent une petite comparaison du poids linéaire entre plusieurs profils corrects afin de prendre le plus léger². Mais il serait un peu excessif de parler d'optimisation au regard de la méthode utilisée³.

2. car dans le cas de l'acier, l'hypothèse «moins de poids = moins d'argent» se vérifie souvent.

3. non pas que la méthode soit trop simple, mais plutôt qu'elle soit non systématique : elle risque de passer à côté de solutions plus optimale.

L'optimisation appliquée au design

Dès les années 1970, l'industrie aéronautique est la première à reprendre les éléments de la recherche mathématique^[?] afin de développer une théorie de l'optimisation pour le design : le Multi-disciplinary design optimization (MDO). Il s'agit donc de mathématiques appliquées au design d'objets. L'originalité de la méthode est dans la formulation du problème, directement hérité des problèmes d'optimisation en mathématique⁴, et qui prend la forme suivante :

Soit un élément de design donné. Afin d'optimiser cet objet, il convient de déterminer 5 éléments :

- **Objectives** : Un objectif est une donnée numérique qui doit être maximisée ou minimisée (le poids, la mesure, etc.)
- **Design constraints** : Une contrainte est une condition qui doit être satisfaite pour que le résultat soit recevable. (le rayon de courbure, la portée, etc.)
- **Design variables** : Une variable est un élément contrôlable, un paramètre, qui doit pouvoir être modifié dans un intervalle donné afin de satisfaire les objectifs. (la qualité d'acier ou de bois, le bilan carbone, etc.)
- **Models** : Le modèle réuni tous les éléments précédents afin de simuler l'optimisation. Il s'agit le plus souvent d'une modélisation informatique (bien qu'il existe de très nombreuses manières de modéliser le même problème de structure)
- **Standard form** : Une fois que les objectifs, contraintes, variables et modèle sont exprimés, le designer doit établir l'algorithme traduisant son optimisation ; là encore, elle est souvent informatique⁵ et dépend du type d'optimisation⁶ choisi.

Ce processus de conception d'une optimisation s'applique également aux structures architecturales, s'agissant d'objets conçus. On observe également qu'il s'agit d'une méthode très libre^[?] : elle ne détermine la nature d'aucun des éléments : objectifs, variables ou contraintes. Néanmoins, cette méthode appliquée au design d'objet a des limites : seuls peuvent être optimisés les éléments quantifiables de la structure (poids, coût, dimensions, matière, caractéristiques visuelles, topologie, etc.). On ne pourrait optimiser, par exemple, la beauté ou l'idée artistique d'un bâtiment ; cela n'aurait pas de sens. Également, réaliser un modèle de simulation de l'optimisation peut être un exercice difficile, et l'objectif du modèle d'optimisation est bien souvent de simplifier la structure tout en restant en cohérence avec la démarche de conception.

C'est cette définition que nous considérons comme processus invariant de résolution d'un problème d'optimisation, dans la mesure où elle est directement héritée des méthodes d'optimisation en mathématiques qui sont à l'origine même de la théorie de l'optimisation.

4. voir glossaire

5. Cette problématique est un domaine de recherche très vaste en mathématique et informatique, je recommande à ce sujet ce compte rendu de conférence : [?]

6. voir glossaire

Outil d'analyse : l'architecturologie

L'architecturologie, une science de la conception

L'architecturologie [?] a pour objet d'étude le processus de conception architectural. Son but est de rendre communicable ce travail de conception, par la mise en place d'un ensemble de concepts et d'outils d'analyse. La conception étant un travail de coopération entre de nombreux acteurs (maîtrise d'ouvrage, architectes, ingénieurs, entreprises, etc.), ce qui peut rendre complexe l'analyse du chemin de conception. C'est pourquoi la méthode d'analyse architecturologique s'appuie sur les actions et les discours des concepteurs ; l'origine de ces actions n'est alors que secondaire.

méthode d'analyse architecturologique

L'objectif de la conception est de produire un nouvel objet. Pour ce faire, on réalise une image mentale de cet objet : c'est le modèle architecturologique. Ce modèle, à mesure qu'avance la conception, subit un certain nombre d'opérations qui visent toutes à en changer les mesures. Ces opérations d'attribution de mesures sont justifiées et trouvent leur origines dans un aspect de la conception (le terrain, le voisinage, le budget, etc.). Ces différents aspects s'appellent *Echelles architecturologiques* et nous en dénombrons vingt⁷.

Il y a quelques limites à l'architecturologie : la conception architecturale est un phénomène empirique complexe et difficilement restituables, les discours peuvent parfois suivre la conception au lieu d'en être à l'origine, et l'analyse doit parfois se satisfaire de suppositions sur l'origine d'une opération d'attribution de mesure. Néanmoins, la méthode d'analyse architecturologique reste un outils fonctionnel pour rendre compte de la conception.

Protocole de l'étude

L'étude cherche donc à comprendre ce qui conduit une équipe d'œuvre à optimiser la structure de leur projet et, lorsque cela est possible, d'illustrer le propos avec un exemple montrant les moyens mis en place par l'équipe d'œuvre pour l'obtenir. Nous avons décidé pour cela de nous appuyer sur les vingt échelles architecturologiques pour évaluer leur potentiel à produire une optimisation.

Les échelles architecturologiques servent à donner de la mesure au modèle, selon un point de vue, une référence et une pertinence. Ces mesures varient avec une optimisation des structures. Pour qu'il y ait optimisation des structures, il faut que les décisions prises en références à l'échelle donnent des dimensions qui puissent être variables dans le projet, autrement dit des dimensions *flexible*.

On se rend bien compte que cela dépend des décisions bien sûr ; et qu'il serait donc difficile de s'exprimer sur la possibilité *en règle générale* d'une échelle à produire une optimisation. Pour simplifier la recherche, on se demande ici si certaines échelles ne produisent *que* des décisions aux mesures inflexibles, donc non optimisables.

7. bien que ce nombre puisse évoluer avec l'avancement des recherches architecturologiques. Nous nous appuyons sur les conclusions de [?].

Ainsi, à l'aide des outils et connaissances présentés précédemment, nous pouvons établir le protocole d'étude suivant :

- Présenter une à une les 20 échelles architecturologiques, de manière théorique.
- Discuter de la flexibilité de l'échelle, afin d'établir sa potentialité optimisable ou non-optimisable. Pour ce faire, on peut également s'appuyer sur les exemples donnés par Philippe Boudon.
- Présenter, s'ils existent, des exemples de projets ayant utilisés une optimisation des structures suite à une opération de mesure provenant de ladite échelle, et expliquer au mieux la démarche d'optimisation utilisée.

Nous avons parlé de la flexibilité des mesures produite par une échelle, mais qu'entend-on exactement ? Quand les mesures données au modèle architecturologique à partir d'une échelle peuvent, suite à un processus d'optimisation, subir des modifications afin de *mieux répondre* aux données structurelles ou à la volonté architecturale, alors on considère les mesures *flexibles*. Pour qu'il y ait optimisation des structures par rapport à une échelle, il faut que puisse exister un *optimum* entre les dimensions issues de l'échelle et les dimensions issues de l'analyse structurelle. Si l'échelle fixe les dimensions et que la structure doit suivre, alors il faudra effectuer une vérification ou une prédition, pas d'une optimisation. Par principe, on pose que les dimensions issues de l'analyse structurelle sont flexibles et modifiables. La flexibilité de celles issues d'une des échelles est ce qui est discuté ici.

Analyses des échelles architecturologiques

Échelle technique

«Utiliser des considérations d'ordre technique pour induire une modalité d'attribution de mesures à une partie ou un tout de l'espace architectural.»⁸

Ces «considérations d'ordre technique» peuvent être vues comme des contraintes par les concepteurs : contreventements, nombre d'éléments, temps de construction, etc. Néanmoins, tous les éléments d'ordre technique ne relèvent pas forcément d'une échelle technique ; c'est leur utilisation pour donner de la mesure à l'espace qui détermine leur appartenance à cette échelle. Les éléments techniques sont souvent très flexibles. En effet, il existe souvent plusieurs manières de résoudre un même problème technique : que ce soit la manière de contreventer ou de donner une trame constructive.

Un exemple : La couverture de la grande cour du British Museum

La couverture de la grande cour du British Museum[?] est un exemple d'optimisation due à l'échelle technique. Conçue par Foster + Partners, en équipe avec le Bureau d'étude structure Buro Happold et l'ingénieur éclairage Claude Engle, achevée de construire en 2000 après 6 ans d'étude, elle couvre un rectangle de 92x73m, soit 6700m². Chris Williams et Paul Shepherd⁹, qui a produit le processus d'optimisation et l'analyse non-linéaire de la structure¹⁰ écrivent : «La définition géométrique de la toiture se composait de deux parties : la forme de la surface et la configuration des éléments en acier qui la composent[?].» La couverture a donc été obtenue en suivant deux processus d'optimisation.



FIGURE 1 – Vue aérienne du British Museum, *Foster+Partners*

8. Toutes les citations introducives, ainsi que l'ordre de présentation des échelles, sont issus de [?]

9. du département d'architecture et d'ingénierie civile de l'université de Bath

10. en collaboration avec le Digital Architectonics Research Group in the Centre for Advanced Studies (CASA) de l'université de Bath, sponsorisé par informatix Inc.



FIGURE 2 – Vue intérieure du British Museum, *Foster+Partners*

Dans un premier temps, le processus d'optimisation a été posé comme suit :

- **Objectives** : couvrir la cour en s'approchant de la volonté de l'architecte de créer d'une cloche/un dôme de verre.
- **Design constraints** : Les charges, tout d'abord, mais aussi la surface à couvrir d'être par un rectangle dont on soustrait un cercle. Les charges ne peuvent être communiquées à l'existant que sur le cercle et les coins du rectangle, pas sur la périphérie du rectangle.
- **Design variables** : la forme et la topologie¹¹ de la surface.
- **Models** : plutôt qu'une définition NURBS¹², les ingénieurs sont directement partis d'une définition arithmétique de la surface, c'est à dire une équation.
- **Standard form** : Après avoir cherché manuellement l'équation qui répondait aux critères géométriques, l'équipe a obtenu une équation à une variable : l'angle du cône virtuel sous le cercle central. Elle a ensuite générée une surface pour chaque valeur de cet angle. Les surfaces obtenues ont été comparées pour leur aptitude à reprendre les efforts afin de choisir la forme la plus résistante.

Problem solution : on remarque que les angles de la surface présentent une singularité mathématique¹³, ce phénomène est dû à la nécessité de porter aux coins car la singularité aide le report des charges sur ces points.

11. au sens où la surface n'a pas à présenter un nombre défini de rayon de courbure par exemple ; elle est totalement libre

12. voir glossaire

13. voir glossaire

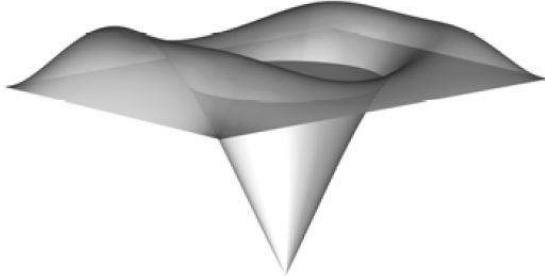


FIGURE 3 – La première équation de la surface ne présentait pas de singularité, *Foster+Partners*

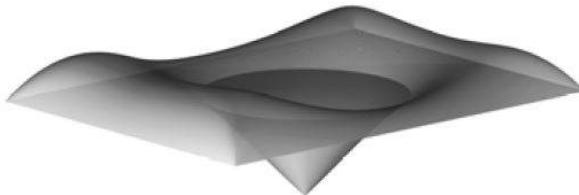


FIGURE 4 – mais une deuxième équation, plus pertinente structurellement, a été mise au point pour permettre des singularités, *Foster+Partners*

Cette première optimisation structurelle répond à un problème d'ordre technique : le bâtiment existant du British museum ne peut pas reprendre de nouvelles charges, c'est en grande partie cette échelle qui a donné sa forme à la structure. Bien sûr, cette optimisation n'intervient qu'après un parti pris de l'architecte (créer une cloche de verre), d'autres échelles sont également intervenues dans la conception architecturale¹⁴. Enfin, la solution *optimale* trouvée ne dépend que de la manière dont le problème a été posé. Ici L'architecte utilise l'optimisation pour, une fois le parti pris énoncé, maîtriser la forme finale de la structure et s'assurer de se placer dans l'optimum structurel de sa démarche.

Il a fallu, dans un second temps, le processus d'optimisation a été posé comme suit :

- **Objectives** : Trouver le nombre, la forme et la disposition des panneaux de verre devant matérialiser la surface.
- **Design constraints** : la proximité géométrique avec la surface trouvée lors de la première optimisation, le nombre d'éléments et la taille des panneaux et également la régularité des points d'impact en périphérie (pour des raisons esthétiques).
- **Design variables** : la disposition, le nombre et la taille des panneaux, le nombre de points d'impact en périphérie.
- **Models** : Une maille triangulaire a été choisie pour deux raisons : elle est structurellement plus efficace qu'une maille carré ou en hexagone et évite de

14. on pense notamment à l'échelle optique dans le choix d'une cloche de verre, Foster a porté une attention particulière à montrer le maximum de morceaux de ciel pour ce projet de canopée.

produire des quadrilatères de verre plat ou des verres courbes¹⁵.

- **Standard form** : Un algorithme récursif de maillage de surface a été utilisé. Le maillage est généré pour chaque n , nombre de subdivision demandé par le concepteur.

Problem solution : On remarque que la solution obtenue est harmonieuse (double symétrie, coaxialité des éléments), cela n'a été possible que par l'intégration de ces données esthétiques dans le code.

Cette dernière optimisation structurelle répond également à un problème d'ordre technique : la dimension et la disposition des panneaux ne peut être trop grande (ce qui générerait des problèmes de production) ni trop petite (ce qui augmenterait le temps de chantier). La solution obtenue est un compromis entre ce critère technique et des critères appartenant à d'autres échelles (l'ensoleillement, l'acoustique, etc.).

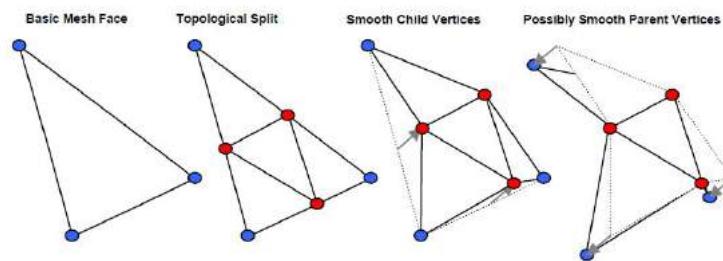


FIGURE 5 – la définition des subdivisions et du déplacement des nœuds suit une logique en quatre temps, *John Tredinnick*



FIGURE 6 – Rendus de plusieurs solutions pour des itérations moins élevées, *John Tredinnick*

15. la triangulation est une solution très commune pour la construction des surfaces non développables, bien qu'il soit théoriquement possible d'intégrer des contraintes de planéité dans les algorithmes. Néanmoins, tout autre type de maillage demanderait de vérifier les encastrements à chaque nœud ; ce qui peut être long et fastidieux, avec un risque d'erreur important.

Échelle fonctionnelle

«Définir les mesures en fonction de l'usage auquel l'espace ou l'élément architectural est destiné.»

Cette échelle fait intervenir de nombreux paramètres, car *l'usage* peut aussi bien décrire des paramètres spatiaux (déplacement, quantité, etc.) que temporels (les cycles du sommeil, l'organisation du travail, etc.). Il est parfois difficile de distinguer ce qui est de l'ordre de l'échelle fonctionnelle et d'autres échelles (géographique, humaine), tant elle peut sembler générale. A première vue l'échelle fonctionnelle n'est pas flexible, le bâtiment répond ou ne répond pas aux fonctions qu'on lui donne. Ces fonctions se chiffrent en m², en nombre de sièges, en relations d'espaces, etc. Pour les rendre optimisables, on peut les poser en termes de minimum : comment assurer telle ou telle fonction tout en garantissant le dessin de la *meilleure* structure ? Seulement dans ce cas on peut formuler un problème d'optimisation.

Un exemple : Le stade de Melbourne

Le stade de Melbourne est un exemple d'optimisation structurelle en réponse à une problématique fonctionnelle. Tous les stades doivent répondre au même enjeu fonctionnel : comment accueillir et protéger les spectateurs des intempéries et du soleil tout en permettant à tous de profiter de la vue¹⁶ sur le terrain ? Dans la grande majorité des cas, la réponse à ce problème est de réaliser une canopée en cantilever qui laisse le stade libre de tous poteaux intérieurs. Mais cette solution est coûteuse en matière et les cantilevers sont des éléments complexes à réaliser.

L'originalité du stade de Melbourne est d'utiliser les propriétés résistantes intrinsèques du dôme géodésique pour réaliser la couverture, d'assembler plusieurs de ces dômes pour les faire travailler structurellement ensemble et surtout, pour notre étude, d'avoir chercher à améliorer les capacités structurelles de cette structure par un processus d'optimisation. L'équipe de conception obtient alors la structure optimale pour résister à l'effort, ainsi que la structure la plus économique étant donné la géométrie de départ. L'optimisation de la structure est là pour servir une décision d'ordre fonctionnel. Encore une fois une méthode sans optimisation aurait pu être retenues, mais les architectes ont fait le choix ici de répondre de manière originale (les dômes géodésiques) et surtout de se placer dans l'optimum structurel de cette démarche.

16. on peut penser qu'il s'agit d'un enjeu qui dépend de l'échelle optique, mais dans la mesure où la vue est la fonction première des tribunes d'un stade, il me semble que c'est à cette échelle que cet élément de conception appartient.



FIGURE 7 – Vue aérienne du stade de Melbourne, *Cox architects*

Le stade de 30 050 sièges, construit entre 2007 et 2010, a été conçu par Cox architects en partenariat avec Arup. Le projet utilise un logiciel d'optimisation de forme, puis de dimensionnement, développé au sein d'Arup depuis plusieurs années. Arup estime que cette optimisation a diminué le poids de la structure de 50% par rapport au projet initial¹⁷.

Le processus d'optimisation a été posé comme suit :

- **Objectives** : Trouver la forme idéale pour la reprise des efforts, puis dimensionner les éléments capables de reprendre ces efforts.
- **Design constraints** : la topologie de la structure est fixée¹⁸ (nombre de nœuds et de barres, les charges sont également fixées). Cette structure est triangulée, elle permet donc le contreventement général de la structure et assure de pouvoir couvrir le stade à l'aide d'éléments plans. La nature des éléments filaires (des tubes métalliques de dimensions standard) est également fixée.
- **Design variables** : la position des nœuds de la structure et la longueur des barres sont modifiables pour trouver la forme idéale. Lors du dimensionnement, c'est l'inertie des barres qui est variable.
- **Models** : Il a été choisi de partir d'un ensemble de dômes géodésiques sphériques solidaires les uns des autres.
- **Standard form** : Le logiciel développé en interne par Arup utilise un pool génétique¹⁹ de formes dont on compare les valeurs des contraintes minimales et maximales au sein de chaque élément. Il s'agit d'une optimisation de forme et de taille²⁰

Problem solution : On remarque que les dômes n'adoptent pas une forme sphérique, en effet, bien qu'un dôme géodésique soit rigide et plus simple à construire quand il adopte cette forme - éléments et assemblages tous identiques - cette forme est rarement optimale si l'on s'intéresse au poids total de la structure.

17. s'agissant d'une structure en treillis de tubes métalliques, l'hypothèse «moins de matière = moins de coût» est vérifiée.

18. contrairement au British museum où cet topologie avait fait l'objet d'une optimisation structurelle.

19. voir glossaire

20. voir glossaire

Le stade de Melbourne résout donc un problème d'ordre fonctionnel par une optimisation structurelle, le stade aurait très bien pu *tenir sans cela*, mais la volonté de répondre par une solution structurelle originale (les dômes géodésiques) et de se placer dans l'optimum structurel de cette démarche à diriger le travail des équipes de conception, et conduit à utiliser cette méthode.

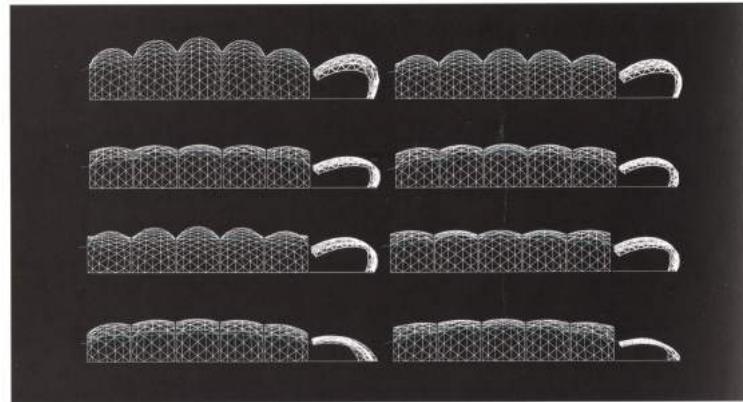


FIGURE 8 – Variations paramétriques de la coupe des dômes, *Cox architects*

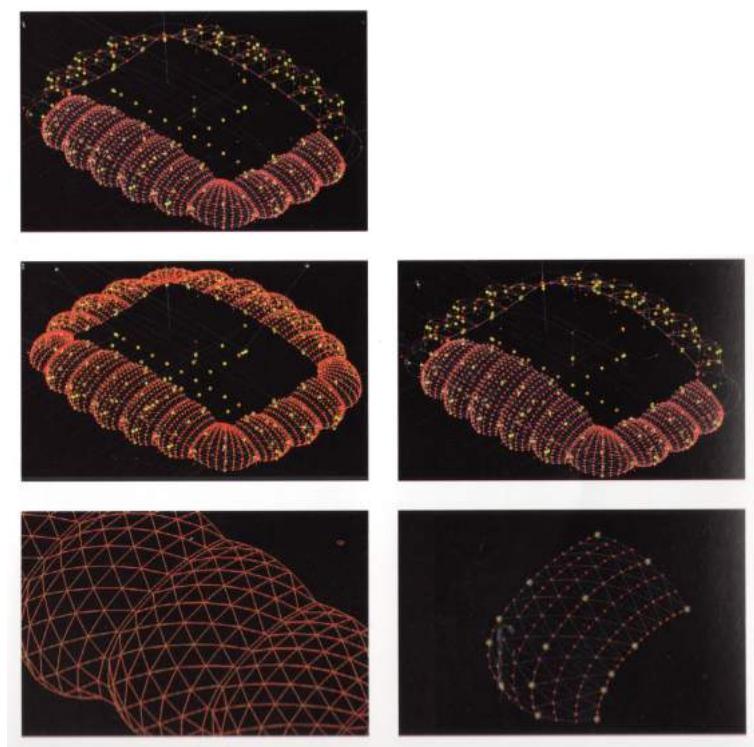


FIGURE 9 – Modèle numérique filaire et ponctuel final des dômes, *Cox architects*

Échelle symbolique dimensionnelle

«La grandeur étant en architecture porteuse de sens, associer le choix d'une grandeur à un contenu spirituel clairement identifiable.»

L'échelle symbolique dimensionnelle donne un caractère symbolique à la mesure. Soit grande, comme l'association du caractère divin à la hauteur des tours des églises. Soit petite, comme l'association de l'intime à l'étroitesse des tiny houses. On est donc dans une échelle qui cherche à associer du symbole à la dimension, ce qui se ramène souvent à *le plus grand possible* parfois *le plus petit*. L'échelle est donc très flexible. En termes de structure elle donne l'objectif sans forcément donner les dimensions structurelles à mettre en place, c'est pourquoi il s'agit d'une échelle qui génère facilement des solutions optimisables structurellement.

Un exemple : La Sagrada familia

Cette volonté de construire haut nécessite parfois de pousser la matière dans ses retranchements. La structure de la Sagrada familia de l'architecte catalan Antoni Gaudí, dont les travaux ont commencés en 1882, a été initialement prévue en maçonnerie. L'édifice est un des édifices religieux les plus hauts (172m). Pour atteindre cette performance, a été utilisé une des premières formes d'optimisation de la matière : l'arc en chaînette.

Le principe est connu depuis longtemps²¹, celui ci repose sur le fait qu'un fil chargé forme un arc ne pouvant reprendre que de la tension, ce même arc inversé et construit en maçonnerie ne lui fait reprendre que de la compression ; ce qui est la meilleure manière de faire la travailler.



FIGURE 10 – Vue intérieure de la nef de la Sagrada Familia, *Creative Commons*

Sachant cela, Gaudí décide de modéliser l'optimisation de sa structure de la manière suivante :

- **Objectives** : Trouver la forme idéale pour la reprise des efforts de compression afin d'atteindre la grande hauteur.
- **Design constraints** : la topologie de la structure est fixée - nombre de nœuds et d'arc - les charges sont également fixées.

21. Dès 1627, le mathématicien allemand Joachim Jung le décrit dans sa *Geometrica Empirica*[?]

- **Design variables** : la position des nœuds de la structure et la forme des arcs sont modifiables pour trouver la forme idéale.
- **Models** : Le modèle est constitué d'un ensemble de fil (représentants les arcs), lié les uns aux autres, et chargé par des sacs de sable (représentant les charges de la structure). Une échelle est donnée à la maquette, ainsi que le respect de la proportionnalité entre les charges.
- **Standard form** : L'optimisation utilise une méthode non calculatoire. C'est la construction de la maquette qui tient lieu de méthode ; une fois achevée le résultat final est connu tout de suite.

Problem solution : La solution obtenue a aidé à développer le dessin de la structure générale. Mais sa complexité et son coût a nuit à la rapidité du chantier, qui ne sera achevé qu'en 2026 selon les prévisions.



FIGURE 11 – Reconstitution du modèle filaire utilisé, chrисpythoughts.wordpress.com

La hauteur des cathédrales gothiques, qui ont elles aussi réussi à faire voler haut la pierre, tenait en partie sur des principes de structure, de tracer et d'intuition. La différence fondamentale avec le travail de Gaudí est la réalisation, au préalable, d'un modèle d'optimisation des structures. Ce modèle est un modèle archaïque, il ne modélise que les efforts de compression (comment, en effet, dimensionner la fibre de l'arc autrement que par l'intuition ou le calcul manuel ?). Mais il permet de s'assurer que l'objectif de construire haut pour symboliser la puissance spirituel puisse être atteint au moyen de la maçonnerie.

Échelle symbolique formelle

«concevoir l'espace architectural en conformité avec une forme symbolique».

Le concepteur use donc des éléments symboliques pour donner de la mesure à l'espace. La *forme* est un terme très général, mais ce qui est sûr c'est que certaines formes très libre peuvent posséder des dimensions flexibles que l'on pourrait optimiser. Dans cette échelle, le symbole ici vient de la forme. Est-il alors possible d'optimiser la forme *au regard* du symbole ? C'est à dire sans en perdre le symbole.

Cela semble possible dans certains cas, par exemple quand la forme même de l'optimisation peut en soit être une référence symbolique. La nature et la théorie de l'évolution sont souvent cités comme des références d'optimisation formelle, une observation qui est à l'origine de la démarche biomimétique en ingénierie. Il s'agit alors d'imaginer que l'optimisation puisse générer une forme à laquelle on associe un symbole.

Un exemple : La cité de l'éducation du Qatar

L'arbre sidra est emblématique du Qatar et de sa culture, dont il symbolise la recherche de la connaissance divine. C'est pourquoi l'architecte japonais Arata Isozaki a décidé de s'en inspirer pour concevoir le porche d'entrée de la cité de l'éducation du Qatar, constituée d'une dalle de 250x35m. Il confie la réalisation de cette arbre à l'ingénieur Mutsuro Sasaki, qui cherche à en optimiser structurellement la forme par un processus d'optimisation topologique EESO[?]. Pour être constructible, la forme libre de l'arbre a dû être reprise par l'équipe du Büro Happold, qui décide de construire l'arbre à partir de plaques d'acier planes soudées afin de former des PRS²² en forme de tubes de section octogonal. Ces tubes sont recouverts d'une seconde peau en acier de 6mm d'épaisseur afin de garder le caractère «organique de l'arbre». Pour que cette construction soit possible, il a fallu faire une première optimisation pour trouver le chemin idéal des forces, puis une seconde pour réaliser les tubes octogonaux qui respectent le mieux ce chemin au sein de l'enveloppe de l'arbre.



FIGURE 12 – Vue extérieure du porche, *QNCC.qa*

Bien qu'il s'agisse d'une copie, le porche fonctionne mécaniquement bien comme un arbre : c'est-à-dire uniquement par encastrement. Il me semble important de le préciser car l'encastrement est toujours un problème difficile en structure, sa résolution ici permet au projet d'obtenir une cohérence entre la volonté architecturale de l'ordre de l'échelle symbolique (l'arbre) et le fonctionnement mécanique du projet structurel.

Le premier processus d'optimisation est alors énoncé comme :

- **Objectives** : optimiser le chemin des forces dans la structure afin de produire une forme ressemblant à celle d'un arbre.
- **Design constraints** : le gabarit maximal de l'arbre ne doit pas dépasser les dimensions du toit qui sont déjà fixées. La dalle du toit ne doit pas reprendre d'efforts. Pour que cette dalle puisse tenir, et pour que le passage des visiteurs soit assuré, Sasaki détermine 7 points porteurs pour la dalle et 1 point

22. Profil Reconstitué Soudé

d'appui pour le pied de l'arbre. L'ensemble de la structure est alors formé de 4 arbres identiques et symétriques selon des axes perpendiculaires. Soit au total, 28 points porteurs et 4 points d'appui. Les points d'appui en pied sont massivement encastrés. Les charges à reprendre sont également fixées.

- **Design variables** : la topologie n'est pas fixée, «l'arbre» peut prendre toutes les formes tant qu'il ressemble à un arbre à la fin.
- **Models** : Sasaki donne les contraintes au logiciel qui doit chercher le chemin optimal de passage des efforts en veillant à ne pas dépasser un contrainte maximale donnée. Il modélise informatiquement le modèle en donnant déjà un premier chemin, imparfait, qui relie les 7 points porteurs au point d'appui ; c'est l'itération 0.
- **Standard form** : La méthode d'optimisation EESO, mise au point par Sasaki, est un processus d'optimisation topologique itératif : à chaque itération, le programme reprend le résultat de l'optimisation précédente, ajoute de la matière là où la contrainte maximale n'est pas respectée, et en retire là où passent peu ou pas de contraintes. puis ré-analyse le résultat à l'itération suivante jusqu'à ce qu'il lui soit impossible d'améliorer le système. Le risque de cette méthode est d'obtenir un optimum local et non global²³. Il convient alors de réaliser le pool génétique²⁴ le plus large possible afin d'éviter cet écueil.

Problem solution : La solution obtenue est un arbre à la forme très organique ; une forme intéressante mais compliquée à construire.



FIGURE 13 – Variations paramétriques de l'arbre, *obleo-pr.com*

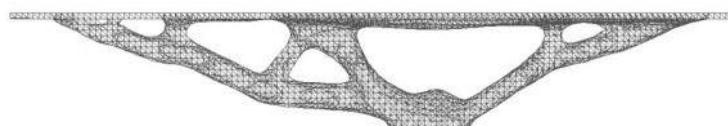


FIGURE 14 – résultat obtenu pour un des quatres arbres, *obleo-pr.com*

Sasaki ne se posait pas encore la question de la constructibilité de la forme. Le résultat obtenu est trop compliqué à construire pour les ingénieurs d'exécution : c'est pourquoi il a fallu re-modéliser et ré-optimiser la structure en éléments plans d'acier.

Pour cette deuxième optimisation, le processus a été :

23. voir glossaire

24. voir glossaire

- **Objectives** : Réaliser l'arbre structurelle en éléments octogonaux, composés de plaques d'acières planes.
- **Design constraints** : Le chemin (axe des tubes octogonaux) est fixé par la modélisation de Sasaki. L'enveloppe de l'arbre de Sasaki est également une enveloppe maximale à respecter.
- **Design variables** : la dimension des tubes et des plaques n'est pas fixée.
- **Models** : inconnu.
- **Standard form** : inconnue.

Problem solution : La solution obtenue est découpée en tronçons d'acier qui seront préfabriqués et transportés sur le chantier. Il seront ensuite boulonnés bout à bout pour former l'arbre.

Enfin il a fallu couvrir ces tubes d'acier de plaques d'acier de 6mm (toute sont courbes et uniques) afin de retrouver le caractère organique de l'arbre. Cela pose une question : à quoi a servi la première optimisation de Sasaki dans la mesure où la réalisation structurelle a suivi son chemin mais pas sa forme ? Je fais l'hypothèse qu'il y a vraiment eu, à l'origine, la volonté de construire l'arbre en éléments structurels courbes, mais que cette volonté a été bloquée pour des questions de coûts. La deuxième optimisation serait alors une optimisation d'origine économique.

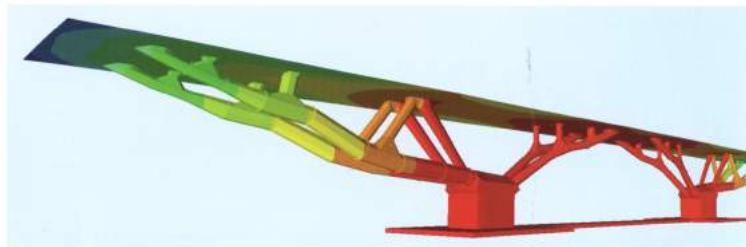


FIGURE 15 – Modélisation des contraintes maximales reprises dans les tubes d'acières
obleo-pr.com

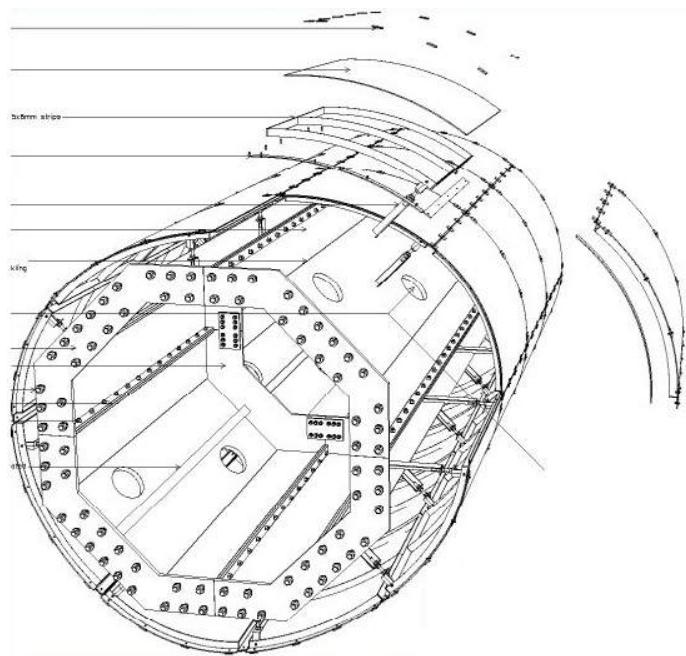


FIGURE 16 – L'assemblage des branches a dû être organisée en deux temps pour simplifier la construction *obleo-pr.com*



FIGURE 17 – Cela à rendu le chantier particulièrement complexe *obleo-pr.com*

Échelle de voisinage

«Attribuer des mesures par contiguïté, relativement à des éléments appartenant au voisinage et induisant une continuité spatial.»

Le voisinage peut être source de dimensions pour le projet. Qu'il s'agisse du voisinage immédiat du projet ou plus lointain, l'architecte peut décider ou se voir imposer une influence de celui-ci sur le projet ; il peut également la nier et construire son bâtiment de manière autonome. Dans tous les cas, les dimensions issues du voisinage peuvent être de nature flexibles. Il est tout à fait possible d'imaginer que le voisinage dimensionne le projet selon des critères variables et sa structure et fasse naître le besoin d'une optimisation.

Un peu à la manière du Citicorp center de New-York, dont l'un des coins est occupé par une église. Cette église devait être en partie détruite pour construire le projet, il fut finalement décidé de la détruire et reconstruire complètement à la même place. Pour résoudre ce problème l'architecte a imaginé poser le bâtiment sur quatre poteaux au centre du bâtiment, plutôt que dans les coins. Les ingénieurs ont dû résoudre le problème d'un cantilever de plusieurs mètres ; sans l'usage d'un processus d'optimisation à l'époque. Aujourd'hui il aurait été tout à fait possible de déterminer la structure qui répondra à ce problème de voisinage en usant d'un algorithme d'optimisation des structures. Ainsi, une optimisation structurelle peut avoir sa source dans l'échelle de voisinage.



FIGURE 18 – Le pied de l'immeuble, montant l'église, *misfitsarchitecture.com*

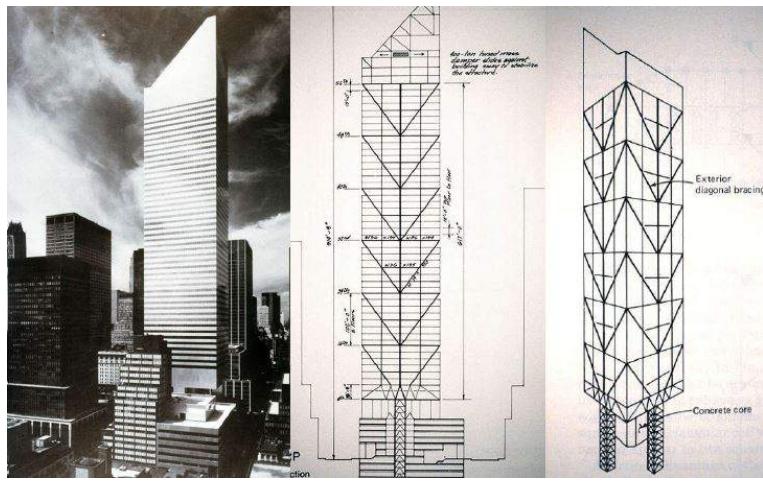


FIGURE 19 – Vue extérieure et schéma de la structure de l'immeuble, *misfitsarchitecture.com*

Échelle parcellaire

«Mettre en oeuvre des mesures en utilisant les possibles permis par la taille, la forme et les limites du terrain données à l'architecte.»

Un exercice très courant en optimisation des structures est celui du pont devant franchir un obstacle. Ce problème fait intervenir toutes les échelles mais la dimension la plus importante pour le pont vient de l'échelle parcellaire : ses points d'appui. En effet, selon la nature de la parcelle on peut en décider autant qu'il nous arrange ou bien être contraint au minimum. Les points d'appuis peuvent alors être contraintes (concevoir un pont qui ne tienne que sur un point d'appui par exemple), ou variables (combien de points d'appui sont nécessaires pour ce pont ?). D'une manière générale, les dimensions issues de l'échelle parcellaire sont souvent flexibles dans la mesure où elles n'imposent pas forcément de dimensions et peuvent donner lieu à des optimisations de la structure.

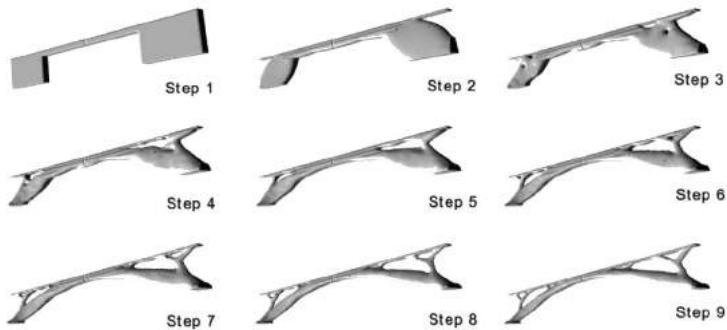


FIGURE 20 – Variation paramétrique d'une optimisation topologique pour un pont, il s'agit d'un exercice de code[?]

Un exemple : Le pont de BaakenHafen

Le pont de BaakenHafen[?] a été construit en 2016. Long de 166 mètres et enjambant un des canaux du port de Hambourg (le troisième port d'Europe), son tronçon central doit pouvoir être retiré rapidement par des camions pour assurer le passage

de cargos exceptionnels, il ne s'agit pourtant pas d'un pont-levis à proprement parler. Ces éléments rendent son calcul un peu plus complexe, car le pont ne peut pas fonctionner en continuité structurelle²⁵, comme le font beaucoup de ponts mais, au contraire, les 3 éléments doivent pouvoir être autoportants une fois démontés ; de plus, le pont prend un angle de 60° avec le canal : ce qui rend encore plus difficile son calcul car il faut prendre en compte la transmission de charges diagonales, notamment pour les effets thermiques.

Tous ces éléments ont conduit les équipes du Buro Happold à mener une optimisation de la structure afin de trouver le dimensionnement idéale pour les poutres principales du pont. Elle a été suivie ainsi :

- **Objectives** : Réduire la quantité de matière utilisée pour les poutres principales du pont.
- **Design constraints** : Le matériau (béton armé), la position des éléments et les charges sont fixés.
- **Design variables** : la dimension des poutres (éléments filaires) est à déterminer.
- **Models** : Le modèle du pont à d'abord été réalisé sur Rhino5, avant d'être maillé et dimensionné sur Hypermesh OptiStruct, un logiciel généraliste utilisant un algorithme d'optimisation.
- **Standard form** : Il s'agit donc d'une optimisation topologique et de la taille réalisée à l'aide d'un algorithme récursif de type EESO[?].

Problem solution : La solution obtenue donne la dimension des poutres de béton armé longitudinales ; il s'agit de poutre à inertie variable il est donc d'autant plus intéressant de recourir à ce type d'optimisation pour être dans un résultat très fin.

Il y a eu en réalité deux optimisations : la première concernait la répartition des contraintes au sein de la poutre, l'autre concernait le dimensionnement des éléments en réponse à ses contraintes. Je ne sais pas s'il s'agit d'une limite du logiciel : Hypermesh OptiStruct est un logiciel généraliste, il est peut être difficile de lui demander d'optimiser plusieurs facteurs parallèlement.

Ou bien une volonté de design : en répartissant les contraintes on s'assure que la section du profil à inertie variable obtenu ne variera pas trop entre les points de contraintes minimales et maximales.

25. voir glossaire

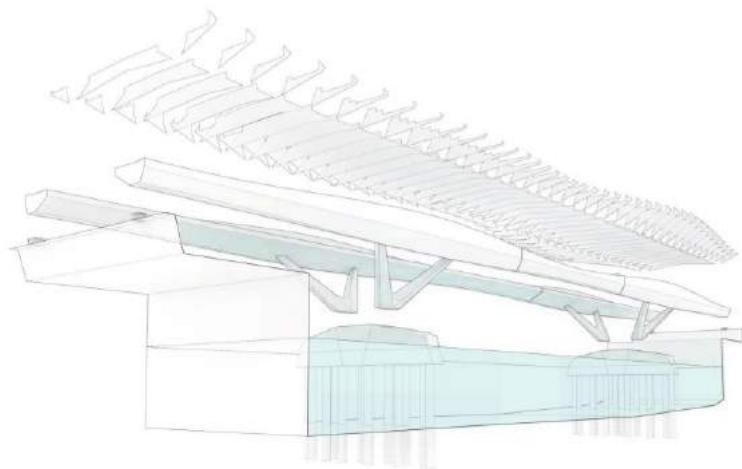


FIGURE 21 – Le pont est une structure mixte avec des éléments longitudinaux en béton armé, et un tablier en acier, *BuroHappold*

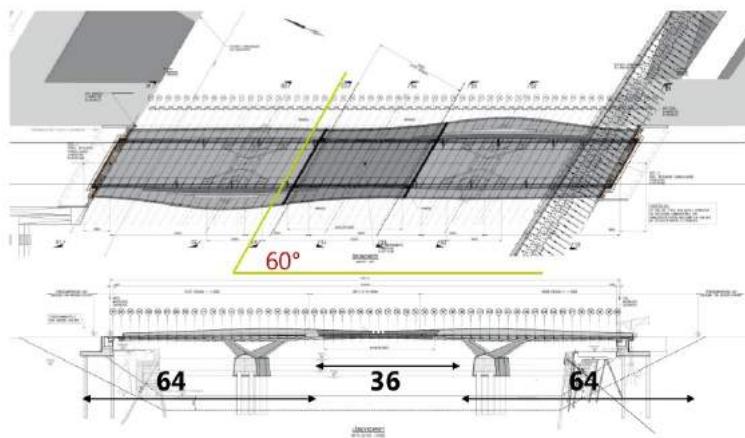


FIGURE 22 – Le pont se sépare en trois travées qui doivent pouvoir être indépendante les unes des autres, *BuroHappold*

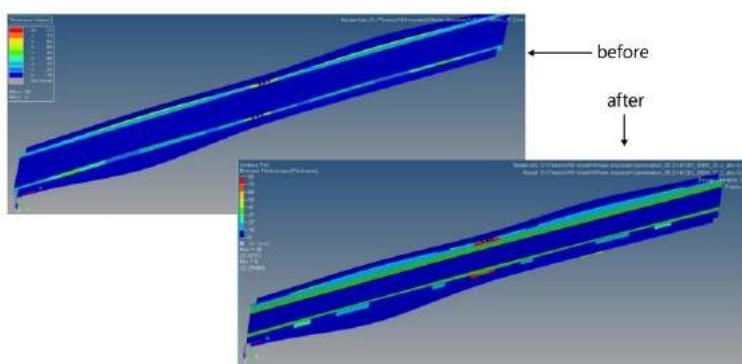


FIGURE 23 – L'optimisation donne un résultat sous forme de distribution de contrainte, de dimensions et de quantité de matière utilisée, *BuroHappold*

Échelle géographique

«attribuer des mesures relativement à des considérations sur l'orientation solaire, le relief, les données climatiques.»

Ces données géographiques peuvent être quantifiées, modélisées et être à l'origine de mesures pour le projet. Elles impactent souvent directement la structure et sont imposées au projet. Pour autant, elles ne sont pas que des contraintes car leur résolution (c'est à dire les dimensions du projet en rapport avec ces données) est rarement unique. Ces dimensions sont donc relativement flexibles et il est alors possible de penser à les optimiser structurellement.

Un exemple : La passerelle du Mont-Saint-Michel

La nouvelle passerelle d'accès au Mont-Saint-Michel a été achevée de construire en 2015 ; son objectif est de permettre la circulation des flux des marées dans la baie, dont l'ancienne digue empêchait le passage. Longue de 760m, elle a été conçue par Feichtinger architecture. Elle doit faire face à la puissance de la marée, dont la vitesse de l'eau peut atteindre les 30km/h. Les piliers de la passerelle doivent donc non seulement porter les charges de la passerelle afin de les transmettre aux pieux en béton ancrés dans le sable, mais également résister aux courants et éviter d'entrer en résonance suite aux phénomènes de dynamique des fluides autour du poteau. Le seul moyen de répondre à toutes ces problématiques a donc été de conduire une optimisation de la manière suivante :

- **Objectives** : Déterminer la dimensions des piliers de la passerelle.
- **Design constraints** : le pilier doit être un tube métallique pour des raisons de dynamique des fluides (les courants viennent de toutes les directions) et doit appartenir aux tubes de diamètre usuel pour des raisons de constructibilité. La position, la longueur et la charge reprise par les piliers est donnée.
- **Design variables** : le diamètre et l'épaisseur des tubes.
- **Models** : inconnu
- **Standard form** :inconnue

Problem solution : Les études de dynamique des fluides ont donc déterminées que les poteaux ne devaient pas excéder 30cm de diamètre. Le produit métallique qui s'en rapproche le plus et qui est capable de reprendre l'ensemble des contraintes est un tube de diamètre 244mm et d'épaisseur 13mm.

La solution est intéressante car la donnée géographique a été incorporée sous la forme d'une dimension maximale à respecter (les 30cm de diamètre), mais elle ne donnait pas de dimension minimale²⁶. Ainsi l'optimisation a pu déterminer l'optimum à la rencontre de toutes ces contraintes.

26. cette dimension étant donnée par le phénomène de résonance à éviter



FIGURE 24 – La passerelle devait résister aux fortes marées de la baie, *Feichtinger*

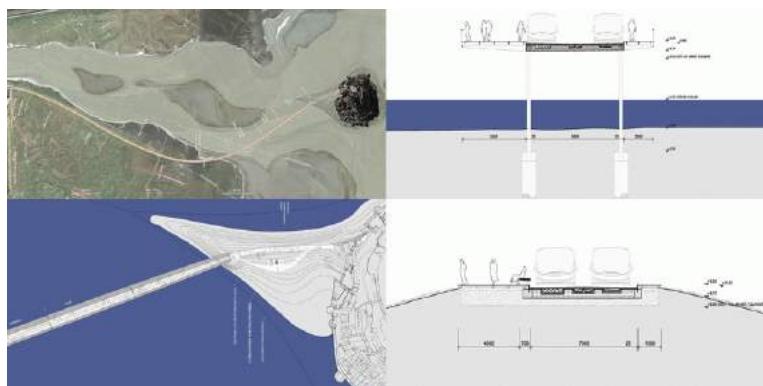


FIGURE 25 – La passerelle achevée ne perturbe pas la marée et n'est pas perturbée par elle, *Feichtinger*

Échelle visibilité

«situer un objet ou une partie d'objet de manière à ce qu'il soit vu ou voit un lieu ou un ensemble de lieux, ou plus généralement constituer un point de vue dans l'espace réel.»

L'échelle de visibilité peut prendre diverses formes ; son expression la plus simple peut être de donner à voir l'extérieur par une ouverture. La position et la dimension de ces fenêtres peut être donnée par une pertinence du point de vue de l'œil humain, de la position de l'objet visé dans l'espace ou, dans certains cas, par la possibilité de créer des vides dans la structure porteuse. Ainsi, dans la maison de Bordeaux de Rem Koolhaas construite en 1998 et véritable jeu d'ingénieur, les ouvertures de la poutre-voile sont situées de manière faussement aléatoire dans les zones qui travaillent le moins mécaniquement. Cette conception n'a pas été dessinée par un processus d'optimisation des structures mais par un processus de vérification, mais il aurait été possible de raisonner ainsi.

D'une manière générale, les dimensions issues de l'échelle de visibilité peuvent être, selon les cas, inflexibles et agir comme contrainte (si il doit y avoir respect d'un axe de symétrie ou d'une hauteur d'œil) ou flexibles et agir comme variables (faire varier les dimensions de l'ouverture pour atteindre un optimum structurelle).



FIGURE 26 – La poutre voile n'est percée qu'au endroit où la matière travaille peu, *OMA*

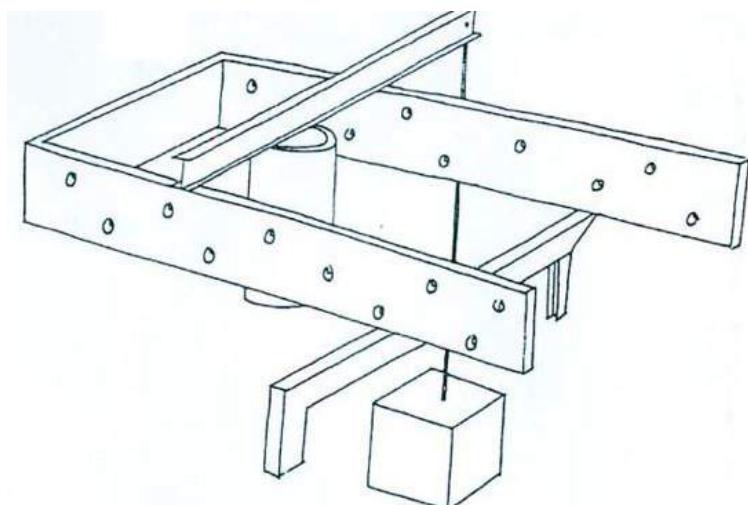


FIGURE 27 – Un des premiers croquis montre la position aléatoire des trous, leur position finale est fixée en grande partie par l'analyse structurelle, *OMA*

Échelle optique

«tenir compte d'un point de vue, au sens propre, pour donner à une partie ou à un tout de l'espace architectural une mesure qui fasse intervenir les modalités suivant lesquelles il est vu.»

Il ne s'agit pas de la même échelle que l'échelle de visibilité, en ce qu'il s'agit avant tout ici de voir l'objet. Cela peut vouloir dire, faire apparaître plus grand ou plus petit, jouer de la forme et de point de vue pour donner une intention. En cela, il est tout à fait imaginable de devoir recourir à une optimisation des structures pour satisfaire à ces critères optiques, car l'échelle donne souvent un objectif et les dimensions de la structure doivent aider à l'atteindre. Il faut pour cela que le problème soit posés à la manière d'une optimisation, par exemple : «comment obtenir, pour satisfaire le regards, la passerelle la plus fine ? ».

C'est la question qu'a dû se poser Rudy Ricciotti en concevant les deux passerelles du MUCEM de Marseille, car la finesse de l'élément réalise un jeu optique saisissant avec le caractère épais du musée et des fortifications militaires en pierre. Je n'ai pas réussi à trouver si la passerelle avait été dimensionnée à l'aide d'une optimisation de la structure ou d'une vérification, mais la première solution est envisageable.



FIGURE 28 – La passerelle est une ligne entre deux masses, *EdmundSummer*

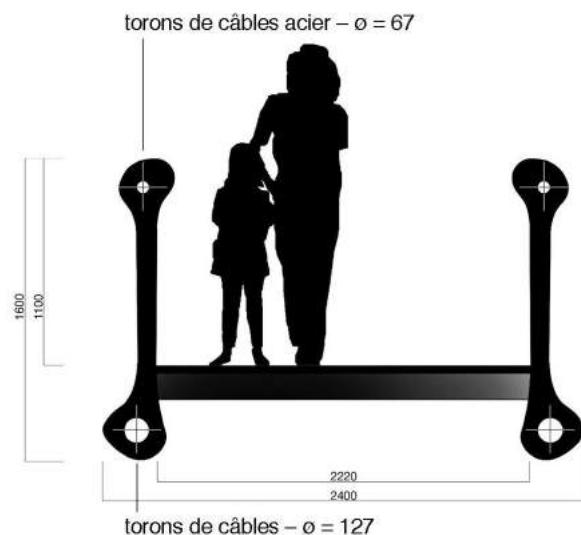


FIGURE 29 – La passerelle est une ligne entre deux masses, *EdmundSummer*

Échelle socio-culturelle

«Prendre en considération des conventions, des formes traditionnelles ou autres héritages socioculturels, pour donner forme et mesure à une partie ou à un tout de l'espace architectural.»

Ces normes et conventions entraînent des modifications mesurables, mais fixes. En effet, la norme sociale entraîne des attributions de mesures qui ne sont pas réellement flexibles, elles ne peuvent être que contraintes. L'exemple-emblème donné par Boudon est la coupe d'un immeuble haussmannien dont la hauteur de plafond croît de haut en bas (les classes supérieurs habitent les niveaux hauts de plafond situé au premier étage, les classes les plus basses habitent les niveaux bas de plafond situés au dernière étage). Optimiser la structure à partir de ces données est impossible puisque les dimensions sont figées ou presque.

De même dans l'exemple de la bibliothèque Laurentine donné par Boudon, où l'escalier des courtisans compte une marche de plus que l'escalier du prince afin que

celui ci arrive en premier conformément à son rang. Ces donnés d'entrées sont figées ; s'il y a une optimisation, son origine proviendra d'une autre échelle.

Au final il ne me semble pas possible de mener une optimisation des structures à partir d'un dimensionnement dû à l'échelle socio-culturel

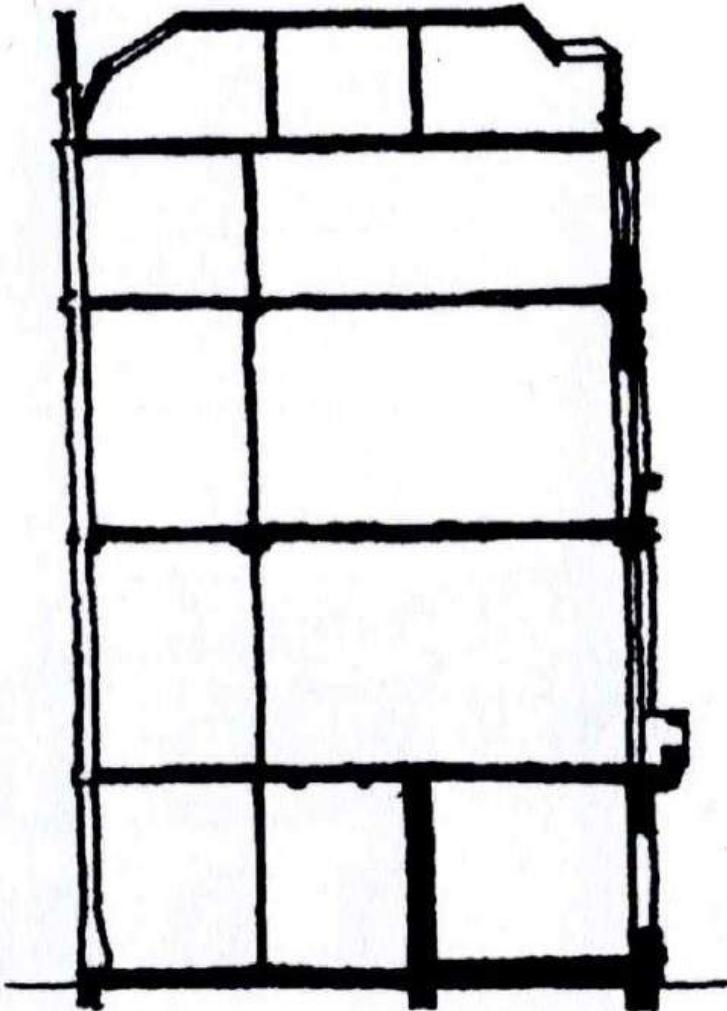


FIGURE 30 – La valeur sociologique de la hauteur d'étage pour l'immeuble parisien tire sa pertinence de mesures fixes, *Boudon*

Échelle de Modèle

«Reprendre un modèle antérieur, tout en effectuant éventuellement des modifications de divers degré et de divers nature».

La répétition des modèles en architecture, copiés ou ré-interprétés, peut modifier la structure. Néanmoins, cette référence fige forcément les dimensions que celle-ci peut prendre au risque de trahir le modèle. La problématique est différente du projet de La cité de l'éducation du Qatar. L'arbre y était pris comme modèle, pour en tirer du symbolisme, mais il y avait une différence majeure : la variation de la forme de l'arbre ne faisait pas perdre la valeur de symbole, dans la mesure où l'arbre était le symbole de l'optimisation structurelle. Selon Boudon, l'exemple-emblème de cette échelle est la copie à l'identique que San Gallo fait du portique de Brunelleschi à la Piazza della Santa Maria Annunziata de Florence. Dans cette exemple on com-

prend bien que les références de mesures prises pour copier le modèle sont rigides. Si la copie avait besoin d'une optimisation de la structure, ce sera pour des raisons économique, techniques, etc. mais pas par rapport au modèle.

Dans la reprise de modèle architectural, le modèle ne peut être qu'une contrainte rigide, jamais une variable. Il s'agira donc toujours de vérifier ou de prédire la structure.



FIGURE 31 – Sur la Piazza della Santa Maria Annunziata San Gallo copie à l'identique le portique de Brunelleschi, la pertinence de cette démarche dépend de la rigidité des mesures, *Creative commons*

Échelle sémantique

«Effectuer des opérations de dimensionnement, de découpage ou de référenciation permis ou suggérés par des mots ou des expressions verbales.»

L'architecte use du langage oral pour expliquer sa conception. Ces mots peuvent renvoyer à des idées abstraites, ou bien des données très concrètes. Il suffit de considérer le cas d'un architecte travaillant autour du mot, et/ou de l'idée, de l'optimisation structurelle elle-même. Si l'architecte fait reposer son projet sur ce mot²⁷ alors il est possible de produire une optimisation des structures à partir d'un mot, à la condition que ce mot n'engage pas de dimensions fixes pour la structure.



FIGURE 32 – On peut légitimement se demander si Füller avait prévu de retrouver ses citations sur des posters inspirationnelles, *quotefancy.com*, relevé dans *Buckminster Fuller : An Auto-Biographical Monologue/Scenario by Robert Snyder*

27. par des références, soit à la nature comme le fait Buckminster Füller, soit à la sobriété et à la modération comme le font les architectes du collectif Encore Heureux

Échelle d'extension

«Effectuer toute opération de conception d'une partie ou d'un tout de l'espace architectural qui intègre un devenir futur.»

Ici, la difficile prédiction du futur empêche la réalisation d'une optimisation des structures, sachant qu'une optimisation n'est possible que pour un problème donné avec un objectif donné. Si l'objectif n'est pas clair ou incertain, c'est vers le surdimensionnement que la structure devra le plus sûrement se diriger. Boudon prend l'exemple du musée à croissance illimitée comme emblème de cette échelle dont le schéma est une spirale. Sur quels critères optimiser la structure, si la gammes de dimensions données comprend l'infini alors il n'est pas possible d'établir un optimum. Les dimensions ne sont pas flexibles dans la mesure où elles n'existent que pour être augmentées.

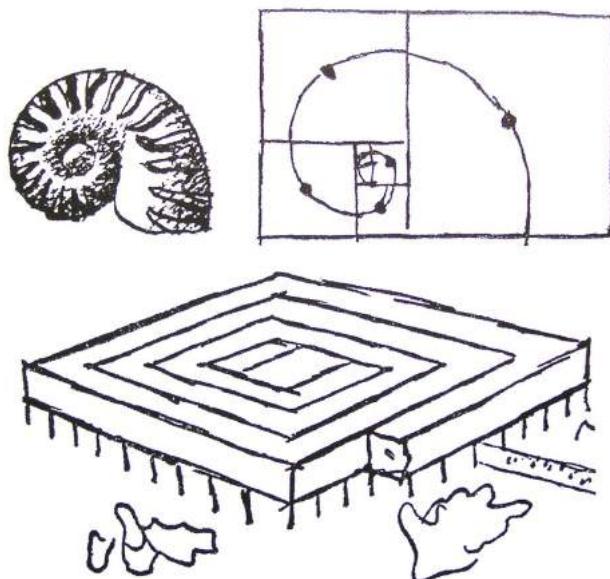


FIGURE 33 – Le musée et sa structure doivent toujours s'étendre, il existe sûrement des éléments qui peuvent être optimiser dans sa structure, mais pas pour le fait qu'il s'étende à l'infinie, *Le Corbusier*

Échelle économique

«concevoir une partie ou un tout de l'espace architectural en relation avec leur coût, ou en se livrant à des jeux possibles d'échanges de coûts entre diverses parties de cet espace architectural.»

C'est à cette échelle que l'on pense le plus souvent en parlant d'optimisation des structures. En effet, la plupart des optimisations sont dirigées en vue d'optimiser les coûts de la construction. La question du coût est alors souvent réduite à la question de la quantité de matière utilisée. Néanmoins l'idée que moins de matière = moins de coût est naïve. Bien des projets que nous avons déjà présentés, s'ils avaient été envisagés avec l'idée d'être le moins cher possible, se seraient sûrement orientés vers des solutions géométriquement simples ou utilisant des produits standard, afin de

diminuer les coûts de main d'œuvre ou la durée de chantier par exemple.

Cependant, la question du coût reste sous-jacente à bien des optimisations structurelles : au sein d'une gamme de prix donnée, comment s'assurer d'être du côté de la modération ?

Un exemple : Terminal 2B de l'aéroport Charles-de-Gaulle

Il y a bien évidemment beaucoup d'exemple de projet prenant un argument économique comme source de dimensionnement de la structure et d'optimisation, mais je voulais présenter celui là car, ayant travailler sur l'aéroport CDG, j'ai eu l'occasion de découvrir les notes de calcul et les méthodes de l'époque, au début du calcul informatique dans le bâtiment (1979). Le programme informatique²⁸ demandait la construction d'un modèle filaire, auquel on appliquait les charges, et il répondait²⁹ (pour une qualité et nuance d'acier donné) l'ensemble des profils qui pouvait fonctionner. Il n'y avait pas encore d'optimisation à proprement parler puisqu'il s'agit ici d'une prédiction. Mais le concepteur pouvait ensuite choisir les profils qui l'arrangeait. On aurait ensuite pu imaginer que le concepteur écrive un petit programme informatique qui, à partir de cette liste de profil, puisse les classer selon un certain nombre de critères, ce serait alors une optimisation de la structure.

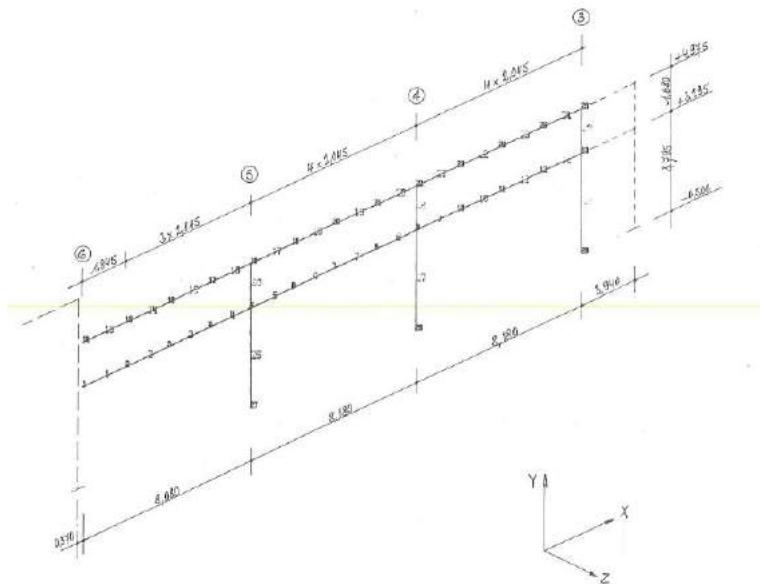


FIGURE 34 – Modèle de calcul informatique pour un multiportique extrait de la note de calcul pour l'aéroport CDG, ADP

Échelle géométrique

«Recourir à des considérations géométriques pour découper ou référer des parties ou des totalités de l'espace architectural ou encore pour transcrire d'autres modalités de mesure.»

28. très semblable aux programmes filaires actuels de type Robot structural analysis

29. en appliquant directement les principes de la théories de poutres pour des éléments métalliques conventionnels

L'utilisation de géométries complexes en architecture peut complexifier la tâche des ingénieurs structures. Certaines géométries peuvent être figées, d'autre laissée très libre. Dans ces cas là, pour rendre compte de la résistance des structures, il devient parfois nécessaire de recourir à une optimisation de la géométrie.

Un exemple : la ville-parc insulaire

Dans ce projet achevé en 2006, l'architecte Toyo Ito a voulu explorer des formes d'ondes inspirées de la dynamique des fluides[?]. Le projets architectural épouse les formes du projet paysagé, il est question de construire trois serres d'exposition de plantes. Ces serres en verre et coque de béton, sont conçus comme des collines qui puisse offrir un panorama sur le parc. L'ingénieur Mutsuro Sasaki³⁰ est appelé pour déterminer la forme *idéale* de chacune de ces coques complexes, c'est-à-dire pour lui, celle utilisant le moins de matière.

L'optimisation se décrit comme suit :

- **Objectives** : Déterminer la forme et l'épaisseur des coques en béton.
- **Design constraints** : La géométrie et les limites de l'espace intérieur est fixé en plan, les coques comprendront une ouverture pour accueillir les panneaux de verre des verrières, les charges sont fixées.
- **Design variables** : la forme et l'épaisseur de la coque en béton.
- **Models** : Sasaki donne les contraintes au logiciel qui doit chercher le chemin optimal de passage des efforts en veillant à ne pas dépasser une contrainte maximale donnée.
- **Standard form** : La méthode d'optimisation EESO, mise au point par Sasaki, est un processus d'optimisation topologique itératif : à chaque itération, le programme reprend le résultat de l'optimisation précédente, ajoute de la matière là où la contrainte maximale n'est pas respectée, et en retire là où passent peu ou pas de contraintes. puis ré-analyse le résultat à l'itération suivante jusqu'à ce qu'il lui soit impossible d'améliorer le système.

Problem solution : La forme obtenue, bien qu'optimale en terme de poids, a été difficile à couler en béton armé. En effet, il a fallu produire des banches non-standard. Il s'agit néanmoins d'un exemple de structure optimisée pour des raisons géométriques plus que pour la constructibilité³¹.

30. que nous avons déjà vu travailler sur le projet de La cité de l'éducation du Qatar

31. contrairement au travail de Nervi sur l'optimisation géométrique des structures pour des raisons de constructibilités.



FIGURE 35 – le projet s'inspire de la forme des collines pour abriter les serres et générer des points de vue, *Toyo Ito*

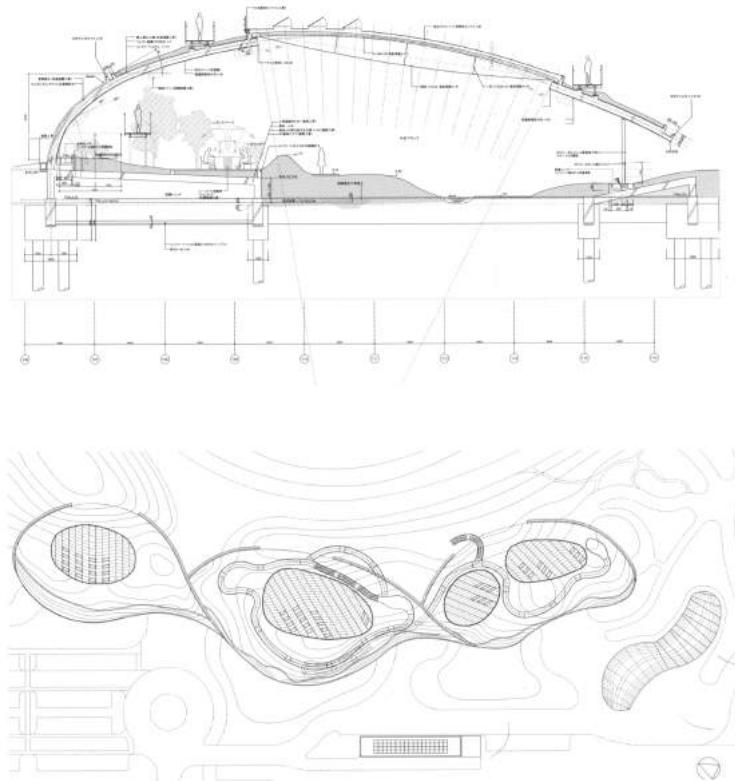


FIGURE 36 – La géométrie complexe et unique du projet a nécessité une optimisation de la structure des coques en béton armé, afin de réduire au maximum la quantité de matière utilisée, *Toyo Ito*



FIGURE 37 – La géométrie du projet a aussi été à l'origine d'un chantier compliqué, *Toyo Ito*

Échelle cartographique

«établir le rapport d'une mesure dans l'espace de représentation à la mesure réelle qu'elle représente, en tenant compte d'un point de vue pertinent.»

L'attribution de mesure passe ici par l'espace de représentation, elle offre donc des possibilités de résolution architecturale qui ne tirent leur pertinence qu'à partir du plan, de la coupe, etc. Cette échelle fixe la mesure et fait évoluer le projet en conséquence. Boudon prend l'exemple de Durand comparant la taille des édifices dans son parallèle des édifices célèbres représentés à la même échelle, postulant ainsi qu'il y

a une pertinence dans la taille même de ces édifices. Lier de la sorte convention de représentation et mesure même de l'élément considéré donne une mesure fixe, rigide.

Ainsi, il est difficile de concevoir une optimisation structurelle à partir de l'échelle cartographique. Cette question pourra naître plus tard, dans la rencontre avec d'autres échelles.

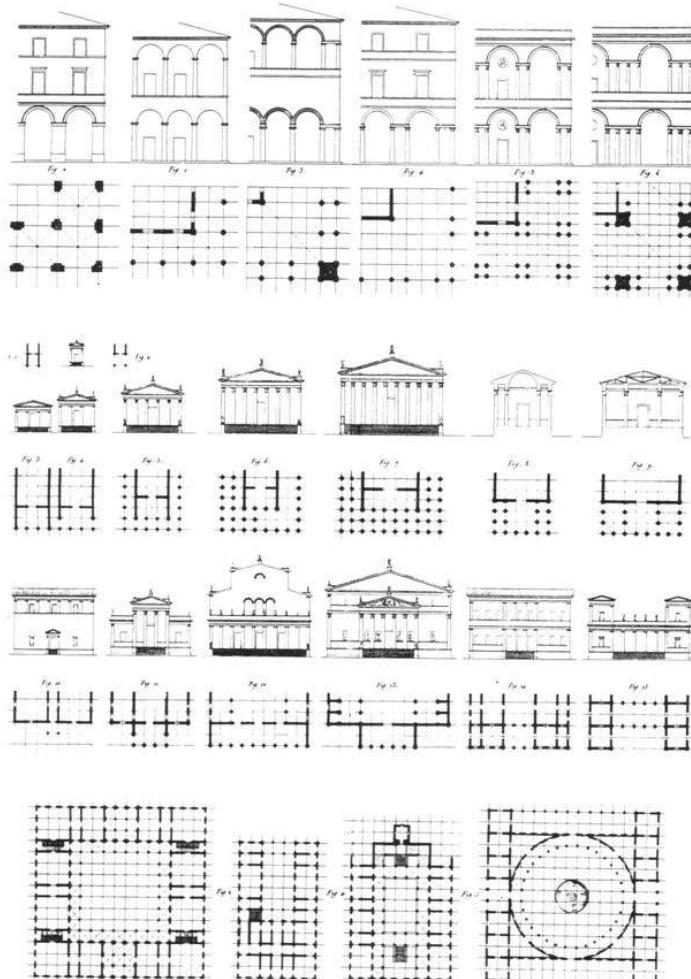


FIGURE 38 – Bien que la comparaison de la taille des édifices fasse naître une pertinence là où il n'y en avait pas a priori, cette décision ne donne pas de mesure qui puisse justifier d'optimiser la structure, *Durand*

Échelle de représentation

«Lier le représentant au représenté suivant quelque pertinence.»

Comme pour l'échelle cartographique, dont il faut différencier l'échelle de représentation, l'attribution de mesure provient de l'espace de ce qui est représenté, l'espace imaginaire de la feuille et de la géométrie descriptive de Monge. Encore une fois la dimension donnée dans cette espace fait référence sur le projet architectural, elle n'est pas variable ou flexible. C'est pourquoi il n'est pas possible d'attribuer une optimisation structurelle à partir de cette échelle. Cette question pourra naître plus

tard, dans la rencontre avec d'autres échelles, comme pour l'échelle cartographique.

Boudon donne comme exemple-emblème de cette échelle l'habitude de Le Corbusier de punaiser le plan du Louvre sur sa planche à dessin lorsqu'il travaillait sur Chandigarh. L'objectif était de mieux se rendre compte des distances de ce qu'il dessinait. Dans cette exemple, nous aurions du mal à voir comment une optimisation de la structure peut se mettre en place, sachant que la référence dans l'espace de représentation (ici le Louvre), ne peut être que contrainte et jamais variable.

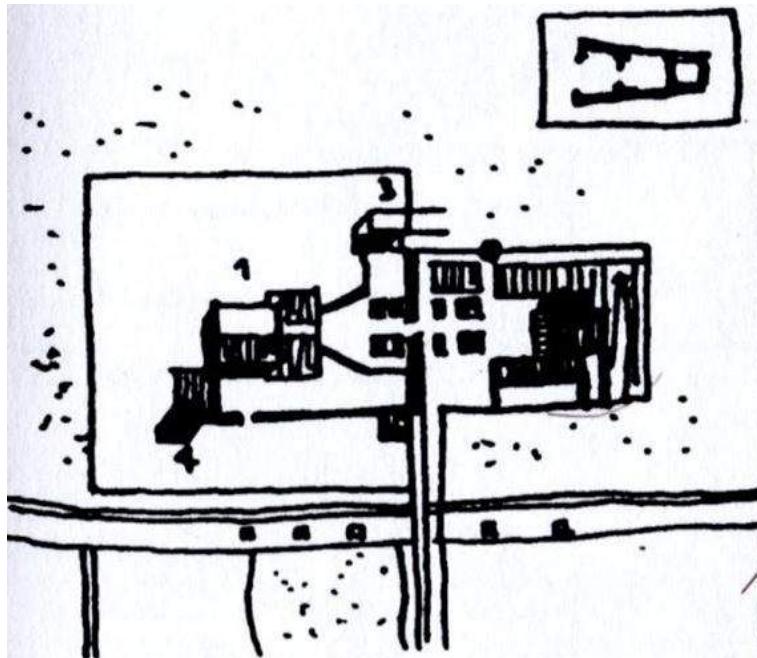


FIGURE 39 – Le premier plan de Le Corbusier pour Chandigarh comparé au plan du Louvre de Paris, *Boudon*

Échelle de niveau de conception

«Découper, référencer, dimensionner la réalité à concevoir, du micro au macro, suivant le niveau de représentation dû à une échelle cartographique ou, plus généralement, découper l'espace de conception en sous-espaces de conception.»

Comme pour l'échelle de représentation, l'attribution de mesure provient de l'espace de ce qui est représenté. De la même manière, les mesures produites ne sont pas flexibles au regard de cette échelle, elle ne produit donc pas les éléments nécessaires à une optimisation des structures.

L'exemple-emblème donné par Boudon, la Maison du Parc de la Montagne à Reims, où la conception du toit est indépendante des espaces de services techniques qu'il accueille, ce qui relève de la pertinence d'une échelle de niveau de conception. Si ce toit doit connaître une optimisation de la structure, ce ne sera pas vis-à-vis de l'échelle des niveaux de conception car on ne peut l'intégrer cette échelle ni comme variable ni comme objectif dans le processus. En somme, on ne pourrait pas atteindre un optimum pour ce toit vis à vis de la pertinence de la décision.

Échelle globale

«Faire jouer de façon dominante, principale ou structurante une pertinence qui peut être le fait de l'une des différentes échelles.»

Les différentes échelles sont toutes susceptibles d'être tenues pour échelle globale, il est également possible que la forme globale d'un édifice relève uniquement d'une échelle globale. Dans le premier cas, l'échelle est optimisable à la condition que soit échelle de référence le soit. Dans le second cas, il est également possible d'utiliser une optimisation des structures dans la mesure où l'échelle globale peut produire la nécessité d'une optimisation de la structure pour chercher un optimum de la dimension. L'exemple des figures scalantes (qui reproduisent localement la même forme que la forme globale), comme la pyramide du Louvre de I.M Pei prise en exemple par Philippe Boudon, montrent la possibilité d'y faire jouer une optimisation structurelle, par exemple en rapport avec le nombres de divisions locales, un peu à la façon de la deuxième optimisation du British Museum que nous avons déjà vu.

Échelle humaine

«Établir une relation directe entre une partie ou un tout de l'espace architectural à concevoir et la forme, la taille humaine ou les dimensions du corps humain.»

L'échelle humaine peut se confondre avec l'échelle fonctionnelle dans la mesure où l'architecture est a priori conçue pour les humains, et doit donc répondre à leur échelle. Néanmoins, une hypertrophie idéologique et philosophique de l'humain peut conduire à penser l'architecture littéralement *en fonction* de l'être humain.

Si, comme Philippe Boudon le constate, l'échelle humaine peut se réduire à une caractéristiques essentielle de l'échelle fonctionnelle, alors il est envisageable que, comme elle, elle puisse nécessiter la réalisation d'une optimisation structurelle.

Conclusions de l'étude

Récapitulatif

Lors de ce travail, nous avons donc décrit les différentes méthodes de calculs des structures dont l'optimisation fait partie.

Nous avons également présenté l'architecturologie et la manière dont nous en usons pour cette recherche.

Nous avons enfin analysé les différentes échelles architecturologiques, afin de déterminer si elles pouvaient être potentiellement à l'origine d'une optimisation structurelle.

De cette analyse nous pouvons dresser le tableau suivant :

Échelle	Optimisable ?
Technique	oui
Fonctionnelle	oui
Symbolique dimensionnelle	oui
Symbolique formelle	oui
Voisinage	oui
Parcellaire	oui
Géographique	oui
Visibilité	oui
Optique	oui
Socioculturelle	non
Modèle	non
Sémantique	oui
D'extension	non
Économique	oui
Géométrique	oui
Cartographique	non
Représentation	non
Niveaux de conception	non
Globale	oui
Humaine	oui

Qu'en déduire ?

Nous avions fait l'hypothèse qu'il fallait qu'une échelle donne à l'espace des mesures flexibles, c'est à dire dont la pertinence vis-à-vis de l'échelle et de la structure peut connaître un optimum, pour qu'on puisse établir une optimisation. L'hypothèse semble être validée. En effet, les échelles qui nécessitent forcément de fixer les dimensions pour être pertinentes (comme l'échelle socioculturelle, de modèle, de cartographie, de représentation), ou bien les échelles qui tirent leur pertinence sans nécessiter de dimensions fixées car elles s'appuient sur des dimensions relatives les unes aux autres (comme l'échelle d'extension ou de niveaux de conception) ne nous apparaissent pas optimisables. En revanche, les échelles dont la pertinence dépend de la mesure et que nous avons essayé d'illustrer au maximum par des cas concrets.

La méthode utilisée (analyse systématique des échelles architecturales) devait permettre de n'omettre aucun cas (là où une approche par étude de cas, également considérée, aurait été limitées par l'accès à l'information sur les projets). En cela la

méthode a fonctionné puisque des cas on pu être envisagés sans être appuyés par des exemples architecturaux construits. Elle est néanmoins limitée par l'avancement de l'architecturologie, dont le nombre des échelles est un objet de débat, ainsi que par ses limites (la difficulté de restituer précisément le processus de la conception architecturale).

La portée de cette recherche visait principalement à élargir la connaissance sur l'optimisation des structures en démontrant que l'idée assez répandue selon laquelle l'optimisation des structures sert uniquement un intérêt économique était une idée reçue. Il s'agissait de trouver des exemples ou des cas tirant profit d'une optimisation des structures pour d'autres raisons. Je pense que l'étude a pu démontrer qu'une optimisation n'est pas forcément économique et peut avoir d'autres origines.

A terme il pourrait être intéressant d'augmenter l'étude de plus d'exemples concrets, ou bien de trouver des exemples qui contredisent la classification établie, ce qui permettrait d'agrandir le nombre d'échelles qui peuvent entraîner une optimisation des structures, ou bien de renforcer les conclusions de cette études. Enfin, au sein de chaque échelle, il peut être intéressant de classifier les décisions d'attribution de mesures relatives à l'échelle qui peuvent entraîner une optimisation structurelle, de celles qui ne le peuvent pas.

Enfin, un autre projet - plus technique - pourra se poser la question des limites de l'optimisation des structures en architecture. Je pense notamment à la complexité de simulation pour les matériaux non-isotropes comme le bois[?], ou à l'intégration des incertitude de fabrication dans l'optimisation.[?]. Ces enjeux sont, il me semble, capitaux pour le développement de l'intégration de données architecturales dans la conceptions des structures.

Glossaire

Le vocabulaire de l'architecturologie

L'idée

La conception d'un bâtiment n'est pas la seule somme des contraintes qui lui sont appliquées, il fait l'objet de choix de conception. Ces choix de conceptions sont guidés par l'idée que l'architecte se fait du futur édifice. L'idée, dans les discours architecturaux, est parfois appelée «parti pris», «concept», «type», etc. L'expression de l'idée se fait souvent par des mots ou des images afin de communiquer le sens pris par la conception architecturale.

La perception

L'architecture construite et l'architecture conçue sont perçue différemment. L'architecture construite, perçue par un observateur, utilise tous nos sens et notre déplacement pour reconstituer une image mentale de l'édifice. La conception de l'architecture, à l'inverse, utilise presque uniquement la vue et, présentant une synthèse du bâtiment, demande un effort cognitif pour constituer une image mentale d'un point singulier de l'édifice.

L'usage

L'usage est une donnée *a priori* intrinsèque de l'architecture, un bâtiment accueille des «usagers». Néanmoins, il existe une diversité d'usages de l'espace qui complexifie la tâche du concepteur, lorsqu'il doit déterminer «l'usage» de chaque espace. Cette complexité et souvent ramener à la «fonction» de l'espace : l'usage pour lequel l'espace a été premièrement *conçu* (logement, espace de travail, *etc.*). Ce n'est évidemment pas le seul usage qui en sera fait mais la conception ne peut imaginer et prendre en compte beaucoup plus de complexité.

Le système

Un système est une organisation d'éléments suivant des règles explicitent. L'architecture construite est un système et l'architecture conçue aussi. Le système est abstrait, un bâtiment ou un élément architectural peut être appréhender comme relevant de différents systèmes : système constructif, urbain, de composition. Il s'agit néanmoins d'une notion utile à la compréhension de l'architecture conçue et/ou construite.

Le discours

De nombreux architectes dissertent sur l'architecture : livres, traités, manifestes ; ils produisent un discours, avec une finalité : convaincre d'une doctrine, expliquer une démarche de conception, comprendre un phénomène architectural, ou autre. Ces discours mettent des mots sur l'architecture et permettent ainsi de la concevoir, montrant le chemin intellectuel de la conception.

L'espace architectural

L'espace architecturale est l'espace construit, non seulement en termes concret - celui du génie civil - mais également en termes intellectuels : ce qui relève d'une

construction de l'esprit. Ainsi tous les espaces bâtis existent mais ne sont pas forcément construit au sens de *pensé*.

Le projet

Le terme «projet» définit globalement le travail d'élaboration qui précède la réalisation d'un édifice. Il peut aussi bien désigner l'ensemble des documents qui préfigure l'édifice, que la négation autour de cet édifice et, dans le cas de l'architecture de papier, l'objet de la recherche architecturale.

Le processus et la conception

L'histoire de la conception présente de nombreuses tentatives de contrôle rationnel de l'activité artistique de l'architecte : les processus de conception sont des *méthode* qui doivent aider l'architecte dans son travail, de manière plus ou moins doctrinale. Récemment, le développement des outils informatiques à également fait apparaître de nouveaux processus de design s'appuyant sur les nouvelles capacités de ces outils. Finalement, l'optimisation des structures s'inscrit dans cette tendance comme un des processus d'aide à la conception.

L'espace de conception

Le travail de conception donne forme et mesure à l'espace. Mais là où l'espace architectural désigne l'espace concret sur lequel travaille l'architecte, l'espace de conception désigne l'univers de pensée dans lequel l'architecte propose des processus ou des modalités de conception. C'est un «espace» au sens métaphorique.

L'espace architecturologique

Le terme de «projet» désigne déjà trop de réalités et l'espace de conception est relativement étanche à l'investigation extérieur (la fameuse «boîte noire» de la conception), c'est pourquoi il convient d'appeler espace architecturologique la part de l'espace de conception que la modélisation architecturologique permet d'expliquer.

La mesure

L'activité de l'architecte est de concevoir l'édifice, c'est-à-dire de lui donner de la mesure, mais cette mesure est toujours relative à l'instrument de mesure utiliser. Les informations quantitatives qu'elle donne peuvent renseigner sur des informations qualitative (par exemple, un espace «bien éclairer») et un espace où l'on peut mesurer un certain nombre de Lux. Si la mesure est le moyen de concevoir l'espace, il n'en reste pas moins que les modes d'attribution de la mesure ne s'appuient pas forcément sur des objectifs chiffrés.

La référence

Pour s'aider à donner de la mesure à l'espace, on peut user de références. Les références, en architecturologie, désignent les liens que l'architecte décide de bâtit entre différents éléments de la conception. Cela peut être une référence urbaine (voir tel élément urbain depuis l'édifice conçu, et ainsi créer un lien urbain), ou bien

une référence métaphorique (à un modèle architectural, à un bâtiment se trouvant anciennement sur le site où se trouve le bâtiment)

Le découpage

L'architecte peut établir de multiples références pour donner de la mesure à l'espace. Il est néanmoins nécessaire d'arbitrer la relation entre la référence et le tout de la conception. c'est l'objet du découpage.

La pertinence

Pour découper (donc arbitrer), l'architecte peut se poser la question de la pertinence de l'opération qui exécute. Pour établir la pertinence, l'architecte est obligé d'établir un point de vue. Il sera alors possible d'en apprécier la valeur à partir de ce point de vue comme référence.

La dimension

La dimension est ce que l'architecte mesure : elle concerne l'objet en train d'être conçu dans une opération de mesure et elle est le support de cette mesure. Elle va au-delà de la conception Euclidienne de l'espace à trois dimensions puisque c'est l'architecte qui dote le projet de dimensions : c'est l'opération de dimensionnement. Rajouter une dimension cela peut-être évidemment le temps comme en physique, mais également le coût d'un élément, ou bien son origine géographique dans le cas de références culturelles à un objet architectural.

Échelle et Modèle

L'architecte manipule des modèles, c'est-à-dire des formes qu'il élabore et modifie virtuellement, le modèle est ce sur quoi portent des opérations de mesures. Le modèle subit donc une succession de transformations, chacune de ses transformations possède des caractéristiques de mesures mais également de nature. Ces caractéristiques de nature sont appelées échelles architecturologiques. Il semble, à l'état d'avancement où se trouve l'architecturologie, que la diversité des échelles architecturologiques soit au nombre de 20. Nous les présenterons dans la suite de l'étude.

Le vocabulaire de la structure et de l'optimisation

Optimisation (mathématique)

Le terme optimisation apparaît récemment dans la littérature scientifique. Un des premiers problèmes d'optimisationmathématiques fut énoncé par le mathématicien français Gaspard Monge en 1781, le problème de « la brouette de Monge » : l'objectif est de trouver une méthode pour déterminer mathématiquement le chemin le plus court entre une somme de points donnée (comme un ouvrier déplaçant une brouette entre plusieurs remblais). L'optimisation est pensée avant tout comme un problème de maths appliquées.

C'est au mathématicien et économiste soviétique Leonid Kantorovich (prix Nobel d'économie en 1975) que l'on doit la première méthode d'optimisation pour répondre à ce problème dans les années 1930. Il ouvre ainsi le champs d'une plus large théorie

de l'optimisation en mathématiques, et applique ses découvertes à la répartition des ressources dans l'économie soviétique. L'optimisation devient une branche spécifique des mathématiques. Résoudre un problème d'optimisation consiste alors à déterminer la ou les solutions satisfaisant à un objectif quantitatif, étant donné un ensemble de variables et de contraintes.

Singularité (mathématique)

En mathématique, une singularité est en général un point, une valeur ou un cas dans lequel un certain objet mathématique n'est pas bien défini ou bien subit une transition ; ce terme peut donc prendre des sens différents selon le domaine mathématique auquel il s'applique. Les graphes de fonctions lisses présentent souvent un certains nombres de singularités, ils forment alors des points, des arêtes, des coupures ou des trous.

algorithme d'optimisation génétique

Une des formes d'optimisation les plus courantes³² est l'optimisation par algorithme génétique. Il s'agit, après la définition de l'optimisation, de générer une population de solution que l'algorithme va comparer entre elles afin de sélectionner la meilleure par rapport aux critères donnés. Il s'agit de reproduire les mécanismes de la sélection naturelles.

théorie des poutres

On attribue généralement à Galilée la première théorie moderne des structures : «moderne» car s'appuyant sur l'observation rigoureuse des phénomènes physiques d'expériences reproductibles. Il jette les bases de la théorie des poutres, qui propose d'étudier les éléments filaires de la structure (comme les poutres et les poteaux). L'étude des éléments plans (voile de béton armé par exemple) nécessitera l'utilisation d'outils mathématiques bien plus complexes et n'apparaîtra qu'au XXe siècle avec les recherches de Newmark, Hrenikoff et Courant[?].

Surface non développable

Une surface est dite non développable quand il est impossible de l'aplatir en un plan sans effectuer de distorsions. Les cylindres et les cônes sont des surfaces développables, à l'inverse la sphère et le tore sont non-développables.

Optimum local ou global

Une même fonction mathématique peut posséder plusieurs points de valeur minimale ou maximale (ils se caractérisent par une dérivée égale à zéro). Lorsque l'on cherche le minimum ou le maximum de la fonction, il faut veiller à trouver le plus grand des maximums (le maximum global) ou le plus petit des minimums (le minimum global). Il y a le risque de se satisfaire de la découverte d'un minimum ou maximum local.

32. utilisée par exemple dans le module Galapagos sur Grasshopper

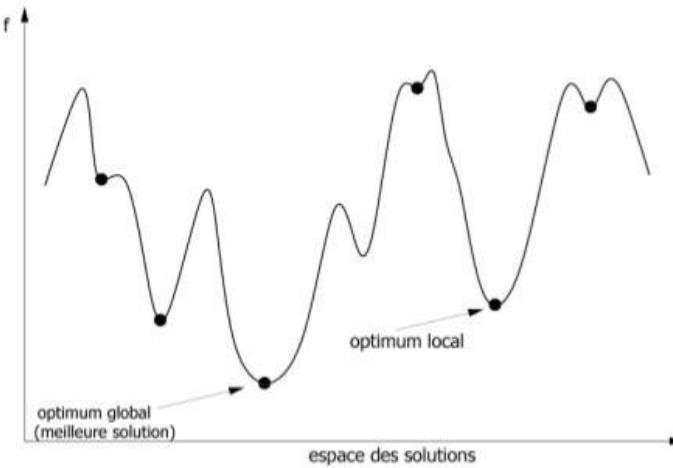


FIGURE 40 – Minimums et Maximums locaux et globaux de la fonction $\cos(3\pi x/x)$ sur $[0, 1 : 1, 1]$, Creative Commons

continuité structurelle

Il est souvent structurellement plus intéressant de faire travailler une poutre en continuité. Ce qui veut dire faire reposer un même élément structurelle sur plusieurs points d'appuis plutôt que de franchir chaque travée avec un élément indépendant structurellement. Cela s'explique par le fait que le moment fléchissant est repris en partie par l'appui, donc qu'il est moins important à mi-travée.

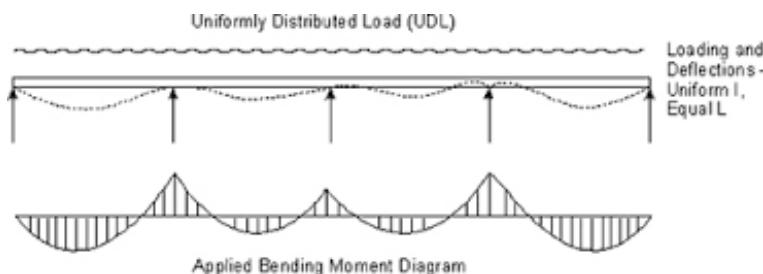


FIGURE 41 – Distribution des moments de flexion dans un poutre continue chargée uniformément, Freelem

NURBS

Les Non-uniform rational basis spline (NURBS) sont des modèles mathématiques très utilisés en modélisation informatique pour générer et représenter des courbes et surfaces. Elles sont très pratiques pour la construction des formes complexes car leur définition mathématique les rends très malléables.

Bibliographie

- [1] Ramm Kurrer. *The History of the Theory of Structures : From Arch Analysis to computational Mechanics.* Ernst & Sohn, 2008.
- [2] Paulino. Where are we in topology optimization ? document non-publié, disponible ici : www2.mae.ufl.edu/mdo/.
- [3] Avriel, Rijckaert, MJ, and Wilde. *Optimization and Design.* Prentice-Hall, 1973.
- [4] Yong Kim De Weck. Structural design optimization. document non-publié, disponible ici : fr.scribd.com/document/345693826/16-810-L8-Optimization-pdf.
- [5] Boudon, Deshayes, Pousin, and Schatz. *Enseigner la conception architecturale.* Editions de la Villette, 1994.
- [6] Burry Burry. *The new mathematics of architecture.* New York : Thames and Hudson, 2010.
- [7] William. Definition of geometry as built, partie 1. document non-publié, disponible sur le site de l'université de Bath : people.bath.ac.uk/ps281/research/publications/burry_preprint.pdf.
- [8] Parmentier. *Leibniz, la naissance du calcul différentiel.* Vrin, 1989.
- [9] Banachowicz Januskiewicz. Nonlinear shaping architecture designed using evolutionary structural optimization tools. 2017.
- [10] Xie Huang, Radman. Topological design of microstructures of cellular materials for maximum bulk of shear modulus. document non-publié, disponible ici : fr.scribd.com/document/225785636/Topological-Design-of-Microstructures-of-Cellular-Materials-for-Maximum-Bulk-or-Shear-Modulus.
- [11] Karasinska. Structural analysis of the baakenhafen bridge and the optimization of chosen elements. document non-publié, disponible ici : www.slideshare.net/altairhtcus/structural-analysis-of-the-baakenhafen-bridge-and-the-optimisation-of-chosen-elements.
- [12] I project, fukuoka, japan 2002-2005. mai 2004.
- [13] Zor Tankut, Tankut. Finite element analysis of wood materials. 2014.
- [14] Cuillère. *Introduction à la méthode des éléments finis.* Dunod, 2016.