

Approche inverse pour la résolution de contraintes structurelles dans le projet architectural.

Mémoire de DEA
« Modélisation et Simulation des Espaces Bâti »
Avril – Octobre 2004
Nadège PERRIN

Laboratoire d'Accueil :

CRAI : Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie

Sous la direction de :

Olivier BAVEREL, professeur.

Jean-Claude BIGNON, professeur.



Université Henri Poincaré
Ecole d'architecture de Nancy
Ecole d'Architecture de Strasbourg
Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg
Institut National Polytechnique de Lorraine

REMERCIEMENTS.

Un grand merci ...

À **Olivier Baverel** et **Jean-Claude Bignon** pour m'avoir suivi durant cette étude et m'avoir orientée dans le développement de ce sujet.

Aux **enseignants de DEA** pour leur investissement et leur capacité à communiquer leurs savoirs comme leurs passions.

Aux différents **professionnels rencontrés** pour avoir contribué à cette recherche : M. Mitsu Edwards, Laurent Becker, François Lausecker, Jean-Christophe Monjardet et M. Loth.

À **l'équipe du CRAI** en général qui a été d'un réel appui dans certains moments d'incertitudes, plus particulièrement Sabrina Kacher et Sylvain Kubicki.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	6
2	PROBLÉMATIQUE.....	8
	2.1 Le projet : processus de réduction d'incertitudes.....	8
	2.2 Le problème : intentions et formes.....	9
	2.3 Problématique.....	11
3	ETAT DE L'ART.....	12
	3.1 Les démarches.....	12
	3.1.1 La démarche directe.	13
	3.1.2 Les modeleurs traditionnels.	13
	3.1.3 La démarche inverse.	14
	3.1.4 Les modeleurs déclaratifs.	15
	3.1.5 Quelques outils en expérimentation.	19
	3.2 Sémantique du mot « structure ».....	22
	3.2.1 Les origines du terme.	22
	3.2.2 La structure est un système.	23
	3.3 Modèles et outils de détermination existants.....	24
	3.3.1 Les modèles de calculs.	25
	3.3.2 Les outils existants.	30
4	VERS DES OUTILS : ANALYSE DES BESOINS.....	34
	4.1 Pratique de la conception technique.....	35
	4.1.1 Regard des architectes.	35
	4.1.2 Regard des ingénieurs.	35
	4.1.3 Les méthodes de travail.	36
	4.1.4 Le regard sur les outils.	37
	4.2 Les données.....	38
	4.2.1 La typologie de la structure.	39
	4.2.2 Les matériaux.	40
	4.2.3 La portée.	43
	4.2.4 Les charges.	44

4.2.5 Quelques scénarios.	45
5 PROPOSITION D'UN PROTOTYPE.....	48
5.1 La modélisation retenue : la statique graphique.....	49
5.1.1 L'intérêt d'un support graphique pour les architectes.	49
5.1.2 Apport de la statique graphique.	49
5.2 Notre modèleur déclaratif.....	51
5.2.1 Le support de programmation : Cabri.	51
5.2.2 Le scénario du problème illustré.	52
5.2.3 Description du modèleur déclaratif.	54
6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	61
7 BIBLIOGRAPHIE.....	63
8 TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	66
9 ANNEXES.....	70
9.1 Les compte rendus d'entretien.....	70
9.2 Les classifications.....	70

1 INTRODUCTION.

La recherche présentée dans ce document s'inscrit dans le contexte du projet en architecture. Nous nous intéresserons plus particulièrement au problème de structure. La conception de structure est un exercice qui fait appel au savoir-faire et à la créativité de l'architecte d'une part et de l'ingénieur d'autre part.



La structure est une des préoccupations des architectes dans le cadre de la conception architecturale. L'une des plus significatives expérimentations de cette préoccupation est retranscrite au travers de la maquette élaborée par Antonio Gaudi pour son projet de la Sagrada Famillia à Barcelone.

Figure 1. Maquette d'étude des voûtes de la Sagrada Famillia de Antonio Gaudi à Barcelone (1892-1926) élaboré par détermination d'amplitude funiculaire.

Afin d'obtenir des courbes funiculaires souhaitées pour les voûtes de sa cathédrale, il a utilisé une méthode non pas par compression à l'image de l'effort retranscrit par ces voûtes, mais par tension. En effet, en inversant le projet, la tête en bas, il a appliqué des poids sur des cordes qui représentaient les voûtes souhaitées. L'évaluation du résultat c'est-à-dire les voûtes en

compression, se faisait au travers d'un miroir posé sur le sol renvoyant l'image à l'endroit des arcs de la cathédrale.

Aujourd'hui la conception de la structure est issue de la collaboration de deux professionnels, l'architecte et l'ingénieur-structure, afin d'apporter des réponses aux contraintes structurelles architecturales, c'est-à-dire de l'ordre de la forme et de l'espace, et aux contraintes structurelles techniques qui sont de l'ordre de sa réalisation.

Basant notre problématique autour de la question de la structure dans le projet architectural, cette étude se présentera en plusieurs temps.

Dans une première partie, nous tenterons de comprendre la nature des problèmes en architecture en général, et plus particulièrement ceux de la structure, afin de formuler notre problématique dans une situation de projet comme processus de réduction des incertitudes.

Dans une seconde partie, nous nous questionnerons sur les différentes démarches de résolution de problème. En effet, ces démarches de résolutions d'un problème dans le cadre de la conception sont diverses mais nous en étudierons deux plus particulièrement : la démarche directe couramment utilisé qui renvoie à un procédé par tâtonnement pour trouver une solution satisfaisante, et la démarche inverse qui orientera plus fortement notre recherche et qui consiste à partir des intentions pour trouver un résultat.

Pour développer notre problématique, il sera essentiel de se questionner sur l'objet de cette recherche : la structure. On étudiera alors sa sémantique ainsi que les quelques analyses en cours sur ce sujet.

La conception de structure étant l'objet de travail de l'ingénieur-structure, il est essentiel de bien comprendre l'ensemble des modélisations qui les soutiennent dans leur tâche, ainsi que les outils d'aide à la conception qui s'apparentent plus à des outils d'aide à la réalisation. Nous aboutirons alors à la nécessité de développer un outil d'aide à la conception basée sur la démarche inverse.

Dans une troisième partie, nous retranscrivons l'analyse des besoins en matière d'outils de détermination de structure au travers d'écrits et d'entretiens qui permettront la formulation des problèmes étudiés, au stade esquisse.

Dans une dernière partie, ces formulations serviront de base à la présentation d'un prototype de principe sur la démarche inverse, à destination des architectes, et intégrant la modélisation de la statique graphique afin de générer des solutions au problème de structure au stade esquisse. Cet outil devra répondre aux besoins évoqués dans la partie précédente.

Nous concluons alors, sur la pertinence du prototype vis-à-vis de la problématique, de ses limites et de ses perspectives d'évolutions possibles.

2 PROBLÉMATIQUE

Notre travail se situe dans le contexte du projet architectural. Afin de bien cerner la problématique développée, il est essentiel de se questionner sur la nature des problèmes émergeant du processus de conception et d'y situer notre problématique particulière sur les structures.

2.1 Le projet : processus de réduction d'incertitudes.

Le projet architectural est le résultat d'un ensemble d'actions menées lors du processus de conception. En s'appuyant sur les travaux sur le dessin d'architecte de Lebahar [LEB1983], on peut définir la situation de projet comme une situation de résolution de problèmes afin de réduire les incertitudes.

Tabouret décrit cette réduction d'incertitude comme une réduction de désordre :

« L'architecture a pour fin la réduction du désordre. Le désordre, en tant que concept n'existe que dans l'opposition ordre/désordre. Affirmer l'existence d'un désordre à réduire, postule l'existence d'un ordre préalable dérangé ou d'un ordre futur à arranger. Réduire le désordre comporte donc en prélude de définir l'ordre à restaurer ou à instaurer »¹

¹ [TAB1975] TABOURET (René).- Figuration graphique en Architecture.- Paris : Atelier de Recherche et d'Etude d'Aménagement, Fascicule 1, 1975.- p 43.

A cette notion de problème s'intègre la notion d'énoncé et de solution. Dans le cadre du projet architectural, la solution au problème posé est la représentation de cet objet. Dans cette optique, le problème est résolu en même temps qu'il est formulé. La formulation du problème demeure partie intégrante du processus de conception dans le sens où elle apporte des éléments qui orienteront de manière significative les recherches de solutions [PRO1992]. A cela, il est important de préciser, d'une part, qu'aucune formulation n'est définitive, elle implique d'autres résolutions qui peuvent la remettre en question, et d'autre part, que la définition de processus de conception présentée reste une version simplifiée par rapport à la grande variété que peut représenter la situation de projet.

2.2 Le problème : intentions et formes.

La réduction des incertitudes est réalisée par la résolution du problème sous forme de formulation et de réalisation d'intentions. On parle alors d'**intentions** comme **énoncé** et de **formes** comme **solution(s)** du problème. Tabouret [TAB1975] en parle comme des « univers de discours »².

Il en dénombre trois :

- La description des **conditions initiales**, c'est-à-dire de la situation matérielle existante qui va être aménagée.
- La description des **objectifs** d'aménagement, c'est-à-dire **les intentions** ou énoncé du problème.
- La description des lieux nouveaux qui pourraient résulter de l'intervention en termes de « **possibles physiques** », c'est à dire l'ensemble infini des dispositions et caractères physiques possibles de lieux.

Dans le cadre de la formulation du problème, les deux premiers univers peuvent être considérés comme finis. En effet, d'une part, les **conditions initiales** restent invariantes quelque soit la description des objectifs ou les solutions possibles, et d'autre part, chaque ensemble d'**intentions** est un problème à part entière, toutes modifications conduiraient à la création d'un nouveau problème.

L'ensemble des **possibles physiques** est a priori infini. Le concepteur désigne une solution à la suite de l'exploration du champ des possibles qu'il réduit par comparaison aux objectifs.

Conditions initiales et intentions.

Pour l'essentiel par description verbale ou par formalisation partiellement quantifiée, les intentions sont isolées et articulées quelque soit leurs niveaux de précision : propriétés du site, contraintes, normes, références et imaginaire du concepteur... Ainsi, elles se rattachent au discours architectural. Leur délimitation a pour objectif la réalisation et donc l'émergence de formes, on parle alors d'actions de réalisation d'effet.

Les intentions ajoutées aux conditions initiales limitent le champ des possibles, apportent une partition, c'est-à-dire qu'elles délimitent les possibles admis des possibles exclus. Ces deux catégories représentent les **contraintes**.

² [TAB1975], Op. Cit. p 47.

Les formes.

Dans le processus de conception, il est donc question de problème et d'objet du problème. Dans le projet architectural, les formes se rattachent à deux catégories d'objets, d'après Siret [SIR1997]:

- les objets **stables**, manifestation matérielle délimitant les lieux. Ex : mur, espace...
- les objets **instables**, phénomènes dynamiques dans le temps et l'espace. Ex : les ambiances, l'ensoleillement...

La nature de l'objet à des incidences sur la formalisation du problème et donc sur la représentation des formes possibles, vues comme lieux et objets proposables eux-mêmes. En d'autres termes, il s'agit des idées ou images que l'on peut s'en faire.

La partition entre **solutions admissibles** et **solutions exclues** est le résultat d'un processus de validation passant par l'induction, la vérification et la validation. Cependant, il est important de tenir compte de la représentation de cette solution. En effet, il est essentiel d'une part de conserver un code porté à connaissance pour rendre possible la décision entre les solutions admissibles et d'autre part d'admettre que l'imaginaire du concepteur prend une part importante dans la définition de la forme proposée. En d'autres termes, dans le cadre du processus de conception, les formes s'affinent pour servir le projet et donc les solutions possibles ne sont guère un accès direct à l'objet, mais un objet en projet.

D'après Tabouret [TAB1967], pour se positionner vis-à-vis des solutions admissibles, on peut réduire le champs des possibles et l'organiser en sous ensembles. Cependant, deux aspects peuvent guider cette organisation : la prise de parti et l'adoption d'un parti.

La prise de parti consiste à structurer les relations internes à chaque univers de discours et de relations objectifs/physiques possibles et conditions initiales/physiques possibles, en décidant priorités, hiérarchie, pondération. Une forme plus subtile de cette prise de partie serait une analyse multicritère et l'optimisation, qui ne favorise pas forcément la liberté du concepteur

L'adoption d'un parti consiste à quitter l'espace d'information du projet pour former une proposition d'objet physique.

Bilan.

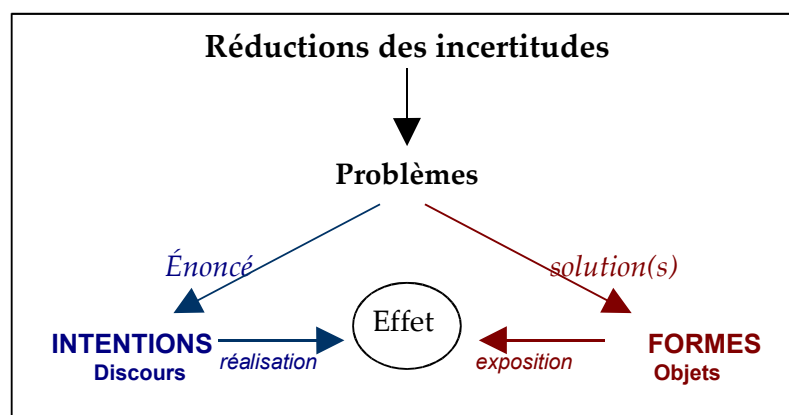


Figure 2. Le projet architectural comme objet et discours.

Ainsi, le processus de conception est un processus de réduction d'incertitudes, permis par la confrontation entre le **discours** (conditions initiales et intentions) et l'**objet** (formes

admissibles). D'après Siret [SIR1997], la tentative de cohérence entre les intentions et les formes inclue une notion intermédiaire : l'effet.

Simplifiant, mais ne résumant pas, le projet suivant les éléments : intentions, formes, et leurs actions (exposition et réalisation d'effet), se pose alors la question de la nature des problèmes qui sont appelés à être résolus : les problèmes directs et les problèmes inverses, ainsi que la question de la justesse de la réponse apportée. Comme piste de réponse à cette seconde question, Tabouret [TAB1967] nous rappelle que même si un bon projet est souvent présenté comme la solution idéale, fruit d'une intention géniale, le projet n'a pas d'autre vérité que celle d'être une œuvre et que le processus de conception n'est pas celui de la recherche d'une perfection arbitraire, mais la poursuite répétée par propositions et évaluations successives, boucle à boucle, de la globalité du projet dans ses différentes intentions et effets.

2.3 **Problématique.**

Notre problématique est centrée sur la conception de structure dans le cadre du projet architectural, c'est-à-dire dans la conception de bâtiment ou d'ouvrage d'art.

Dans le cas de notre problématique, les contraintes permettant la délimitation entre les possibles admis et les possibles exclus sont le fruit d'une mise en commun de préoccupations différentes, de l'ingénieur d'une part, et de l'architecte d'autre part. Indispensables pour la résolution du problème, ces contraintes mises en commun peuvent cependant s'organiser en deux ordres que chaque professionnel nourri de son savoir et de ses intentions :

- Les **contraintes architecturales** assimilées aux préoccupations de l'ordre de l'espace et des formes : forme, portée, ambiances...
- Les **contraintes constructives ou techniques** englobant l'ensemble des préoccupations autres que architecturales : budget, effet climatique...

Afin de développer notre problématique, il est important de se questionner sur le **contenu et la formalisation du problème étudié**. Il est donc essentiel de **bien connaître l'objet du problème, les données qui lui sont propres, la nature des solutions attendues** et la formation des concepteurs.

Fort de ce constat, il est indispensable de se demander **si la génération de solutions reste possible quand les trois ensembles (contraintes architecturales, contraintes techniques, ensemble des possibles) proviennent de personnes de formations différentes ayant une approche propre de la réalité et un langage propre pour la décrire**. Et dans ce cas, **dans quelles conditions les relations logiques entre les intentions et les solutions permettent-elles la génération de solutions ?**

Dans notre approche, il sera donc question de préciser les relations entre intentions et solutions et de rechercher **l'existence d'une modélisation ou transcription graphique commune**, représentant un grand appui dans la résolution de ce type de problème selon Tabouret [TAB1975], et qui **validerait les conditions nécessaires à la génération**.

3 ETAT DE L'ART.

Afin d'élaborer une proposition de réponse vis-à-vis de la problématique énoncée, il est essentiel d'analyser les différents aspects qu'elle englobe.

La formulation du problème est étroitement liée à la **démarche**, comme nous l'illustrerons au travers de l'analyse de deux de ces démarches possibles dans le processus de conception, ainsi que la structures des outils qu'elles impliquent.

Dans un second temps, nous aborderons plus précisément, la notion abordée : la structure. Sa **sémantique** sera étudiée en détail afin de cerner plus précisément ce que cette notion implique.

Dans un troisième temps, nous nous intéresserons à la science qui en est issue. En d'autres termes, nous tenterons d'étudier l'ensemble des **modélisations disponibles** au service de cette science de l'ingénieur, leurs apports vis-à-vis de la problématique, ainsi que les outils d'aide à la conception qui en découlent.

3.1 Les démarches.

Afin de produire des formes cohérentes avec les intentions, un concepteur dispose de plusieurs façons de procéder. De nombreuses recherches sont dirigées sur les différentes démarches possibles de résolution de problèmes dans le processus de conception. Nous nous intéresserons plus particulièrement à deux démarches et les modeleurs qui en sont issus : la démarche directe et les modeleurs traditionnels qui en découlent, et la démarche inverse qui génère des modeleurs déclaratifs.

Dans un premier temps, nous expliquerons le principe de la démarche directe et ses limites qui nous amènent à une seconde méthode, la démarche inverse, que nous analyserons dans un second temps. Afin de restituer les recherches effectuées dans ce domaine, nous nous appuyerons sur les différents travaux menés sur la démarche inverse dans le projet architectural :

ceux appliqués à l'ensoleillement par Siret [SIR1997], ceux appliqués au parcours par Mounier [MOU 1988A] et ceux appliqués à l'ensoleillement et la visibilité par Houppert [HOU2003]. Dans un troisième temps, nous illustrerons nos explications par divers exemples de modeleurs déclaratifs sur les ambiances dans le projet architectural.

3.1.1 La démarche directe.

Le plus souvent, un architecte procède selon une démarche directe (fig. 3). Cette approche consiste à procéder **par tâtonnements** et tentatives de formalisation que l'on compare aux intentions initiales. Cette démarche implique une vision du processus de conception de **type essai/erreur**. Ce procédé n'est pas des plus efficaces, en effet une démarche itérative n'est **pas une garantie de satisfaction** et la longueur du processus peut s'avérer très élevée. Or dans un contexte de projet, le temps représente un facteur important qui influe principalement sur le **coût** de l'opération.

Cette démarche reste **la plus répandue** du point de vue des outils de simulation mis à disposition. Ils impliquent inévitablement un le projet dans sur une forme très définie et donc que le parti soit arrêté. Ils s'appliquent donc postérieurement au processus de conception. Leur absence de participation à la mise en forme du projet en fait des outils de vérification et/ou de correction. Bien qu'indispensables à la réalisation, ils ne répondent pourtant pas à un rôle d'aide à la conception.

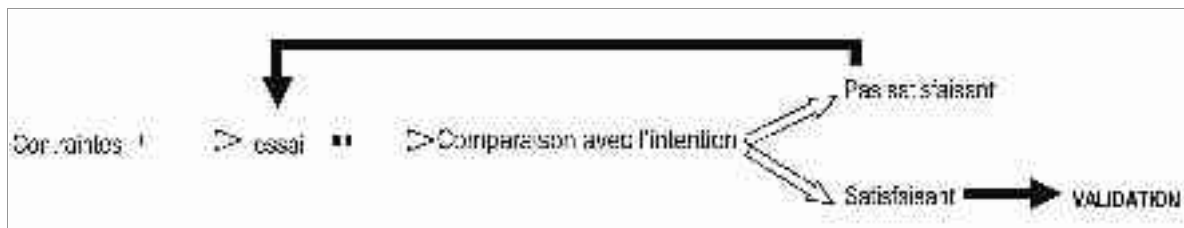


Figure 3. La démarche directe.

3.1.2 Les modeleurs traditionnels.

Issus de la démarche directe, on trouve des outils de la famille des modeleurs traditionnels (fig. 4). En effet l'utilisateur n'a pas une idée précise détaillée de l'objet qu'il veut obtenir (qu'il soit matériel ou non), mais il connaît la plupart de ses propriétés nécessaires, **ses besoins**. Un processus de réflexion lui permet d'imaginer précisément l'objet à construire. Il ajoute au fur et à mesure du processus de conception (en boucle) des propriétés ignorées au départ mais qui sont nécessaires à la définition de l'objet : cela correspond à un processus rigoureux et industriel : la **spécification**. L'ordinateur peut aider le concepteur mais se comporte comme un simple substitue à une feuille de papier. C'est seulement en imaginant une solution que l'on peut exprimer clairement les besoins ou intentions à satisfaire.

L'utilisateur emploie alors une **image mentale de l'objet** à construire qui se doit d'être assez précise pour permettre la construction d'un objet sans ambiguïté, possédant au moins toutes les propriétés requises. Reste impossible à communiquer directement. Il est alors nécessaire de procéder à une **décomposition** de l'objet au travers d'un support informatique. Chaque support nécessite une traduction dans un langage adapté. Exemple pour les outils de modélisation, les mots du langage sont des primitives géométriques et des opérations associées. Leur mise en place dans une interface est leur **construction interactive**. Cette construction produit alors un objet virtuel qui est confronté à l'objet mental pour **validation**. Cette évaluation fait soit naître la

satisfaction, alors l'image est acceptée et l'objet réel peut être fabriqué, soit renvoie à nourrir les besoins et revoir sa spécification. Le travail est en majeure partie perdu.

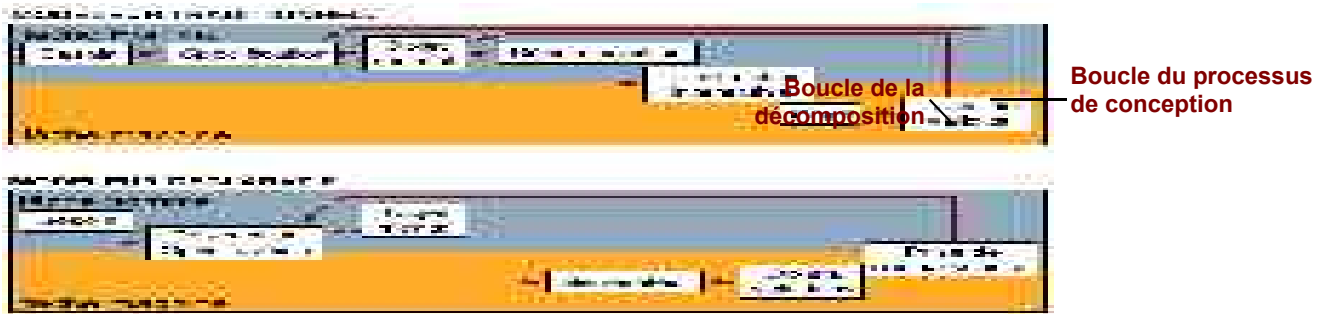


Figure 4. Fonctionnement d'un modèleur traditionnel [MOU1998A]

Ainsi une grande partie du travail dans le cas de l'utilisation d'un modèleur traditionnel est fournie par l'utilisateur. Le modèleur n'intervient que très tard après une multitude d'actions menées entre la phase conception et la phase modélisation. L'objet est traduit puis construit par un langage de bas niveau (ex : primitives géométriques) qui nuit à la créativité et réduit clairement le champ d'actions. Les contraintes sont respectées à posteriori par une confrontation aux intentions uniquement en phase finale. La machine apporte alors très peu d'aide, il permet juste de fixer l'image mentale.

Les limites des modèleurs traditionnels nous poussent à nous tourner vers des modèleurs basés sur une démarche différente.

3.1.3 La démarche inverse.

Dans la démarche inverse (fig. 5), on détermine **les conditions que doivent remplir les formes pour réaliser les intentions**. Dirigée par le résultat, ce procédé est d'avantage **en accord avec le processus de conception** en architecture au sens général de *processus dynamique de formulation/résolution simultanées d'un problème implicite, jamais posé ni jamais résolu définitivement*.



Figure 5. La démarche inverse.

Pour assurer la cohérence entre intentions et formes dans le processus de conception architectural, on s'orientera plus du côté de la démarche inverse dans le domaine de la modélisation géométrique sous contraintes que l'on nommera la **modélisation déclarative**.

Cette **méthode interactive basée sur un support graphique**, propose une approche d'une part **implicite**, puisque le mode de construction géométrique de l'objet n'est pas donné à priori et peut dépendre du contexte d'utilisation, et d'autre part **abstraite** puisque l'objet est défini par des propriétés conceptuelles plutôt que par son aspect matériel réaliste.

3.1.4 Les modeleurs déclaratifs.

Les outils issus de la démarche inverse participent pleinement à la mise en forme du projet. En effet, l'idée est de faire se comporter l'ordinateur comme un collaborateur intelligent, qui se charge des tâches fastidieuses, en utilisant ses connaissances du domaine et de la tâche à accomplir. Les outils qui en ressortent sont appelés des **modeleurs déclaratifs** qui répondent aux limites des modeleurs traditionnels (fig. 6).

Ainsi, ils proposent l'ensemble des solutions qui vérifient les intentions et permettent à la fois un procédé direct et un procédé inverse guidé par l'utilisateur. Les intentions sont vérifiées à chaque étape. Dans l'idéal, ils peuvent s'appliquer quelque soit l'étape de définition du projet grâce à leur capacité à supporter le flou. Les données du cahier des charges sont conservées et utilisées lors de la modélisation. Bien qu'ils représentent un réel potentiel pour le projet, ces outils restent rares dans le cadre de la conception architecturale.

En plus de proposer une imitation (cf. simulation directe), ces outils permettent d'engendrer des formes. Le potentiel pour la conception architecturale se place dans la formulation des intentions modifiables à tout moment et dans son adaptabilité à chaque étape du projet. En effet, les objets sont définis par des effets (description des intentions) et non par leur forme.



Figure 6. Le fonctionnement d'un modeleur déclaratif. [MOU1998A]

Ces outils ne demeurent, cependant, applicables que dans un domaine de connaissances fermé. Dans le cadre de notre travail, nous réduisons la classe de problèmes aux structures, ce qui implique l'élaboration d'une base de connaissance fermée, comme par exemple au travers de l'élaboration d'une classification des typologies structurelles connues, c'est-à-dire répertoriées dans les livres d'analyse structurelle.

Selon les écrits de Siret [SIR1997], la structure d'un modeleur déclaratif est découpée en trois zones (fig. 7) : une pour l'utilisateur dans lequel il exprime ses intentions et manipule les formes, une pour la machine qui supporte le modeleur et une troisième, l'interface, qui fait le lien entre les deux.

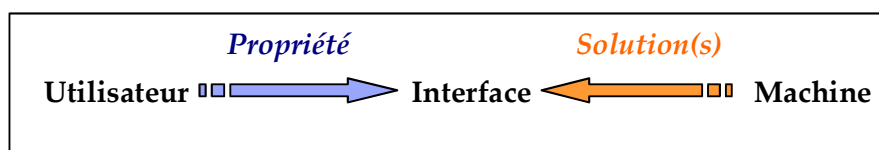


Figure 7. Les trois zones d'un modeleur déclaratif.

Le processus de génération de solutions nécessite trois modules : la description, la génération et la prise de connaissance (fig. 8). Afin de mieux comprendre le mécanisme d'un modèleur déclaratif, il est nécessaire de détailler les objectifs de chaque phase.

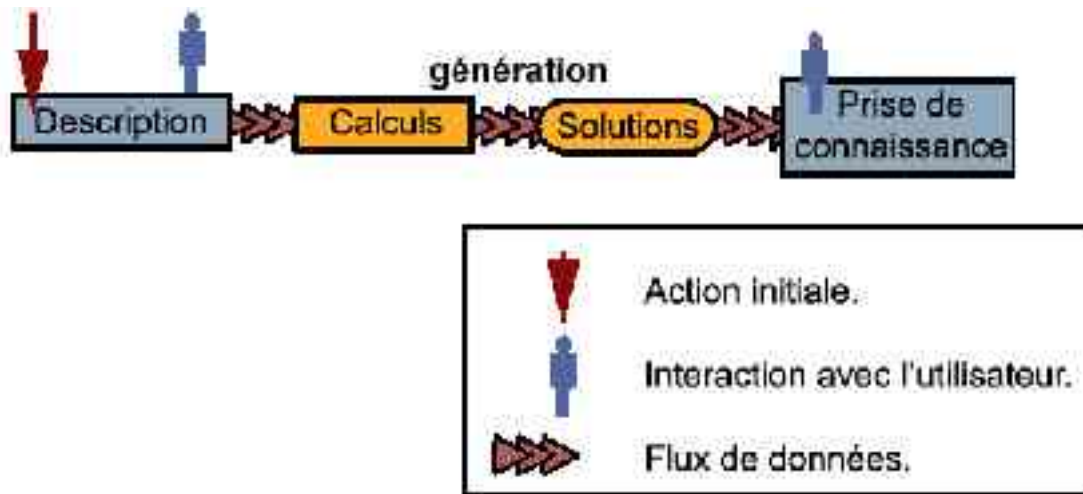


Figure 8. Les trois phases du modèleur déclaratif. [MOU1998A]

La première phase : le langage de conception.

Il permet de représenter n'importe quel problème dans une classe considérée. C'est l'instrument de **description** par lequel sont saisies, instanciées les propriétés que doivent vérifier les formes. Il représente le lien entre utilisateur et interface. Il décrit dans un langage préconstruit les intentions de départ : l'énoncé du problème dans l'interface que la machine est capable d'interpréter.

Les moyens de description passe par le vocabulaire propre à un domaine particulier. L'objectif n'est pas de comprendre le langage naturel dans toute sa complexité mais de rendre moins contraignante l'interaction avec la machine. Il existe plusieurs sorte de propriétés : celles propres aux domaines utilisés par les experts et d'autres, plus générales, communes à toutes les applications, liées à la nature spatiale de l'objet : grand, léger...

Certaines imperfections sont gérées par la machine :

- les éléments implicites de la description, évident seulement pour l'utilisateur.
- le flou.
- l'ambiguïté : ex « grand » est une notion floue.
- l'insuffisance : plusieurs objets peuvent être solutions. Cela devient un problème quand le nombre de solutions devient trop élevé.
- la contradiction aucune solution ne peut être produite.

Dans un modèleur déclaratif idéal, la description de l'objet désiré devrait être aussi naturelle qu'une description à un collaborateur, sans avoir besoin de construire l'objet soi-même. Il ne s'attarderait que sur des propriétés importantes ou inhabituelles. Cependant, des données de bas niveaux (cf. les modèleurs classiques) doivent être intégrées pour permettre l'utilisation du modèleur déclaratif comme un modèleur classique. Le modèleur idéal serait alors un ensemble où deux modèleurs cohabitent.

La seconde phase : la génération.

Intervenant une fois la description effectuée, la **génération** permet de donner en théorie *toutes* les solutions correspondant à cette description. Dans certaines situations, le modelleur peut commencer à travailler avec une description incomplète. La génération doit permettre d'une part la réduction de l'espace de solution et d'autre part l'exploration de cet espace.

La méthode de génération peut être variée : soit à l'aide de calcul, soit par l'emploi de techniques d'intelligence artificielle : ex : les algorithmes génétiques. La plupart des méthodes consistent à explorer l'ensemble de tous les objets possibles (appelé l'univers des objets) pour y découvrir ceux qui sont solutions, c'est-à-dire ceux qui répondent aux intentions. Il est important de trouver une méthode qui permet au modelleur de gérer un grand nombre de solutions, afin que l'outil reste utilisable dans la pratique.

Pour gérer un nombre élevé de solutions, on peut soit constituer des classes de solutions, et la machine se contenterait alors de calculer les solutions par classe, soit passer par le principe de l'ébauche où la machine produit des formes intermédiaires validées par l'utilisateur et à partir de laquelle le processus de génération reprend.

La troisième phase : la prise de connaissances.

Une **méthode de visualisation** permet la **prise de conscience** par différentes techniques de restitutions des solutions : organisation des fenêtres, proposition en évidence de la ou les solutions les plus pertinentes suivant certains critères... Il suffit alors à l'utilisateur de choisir la solution qu'il juge la plus adaptée.

Il ne suffit pas de montrer à l'utilisateur une représentation de la meilleure solution pour plusieurs raisons. D'une part, les détails de la solution fournie par le modelleur sont inconnus de l'utilisateur. En effet l'utilisateur sait que la solution vérifie les intentions de départ mais ignore les autres propriétés qu'elle possède comme par exemple celles issues de la construction : si le modelleur construit une partie de forme et obtient l'ensemble de la forme par symétrie, alors la forme a pour propriété la symétrie. Les propriétés inconnues peuvent aussi être implicites ou fortuite et doivent être découvertes avant d'être présentées.

La visualisation des solutions doit permettre la comparaison. Aussi il est essentiel de tenir compte du mode de représentation en rapport avec la propriété validée. On peut citer par exemple la création d'une image « fil de fer » pour mettre en évidence l'imbrication d'éléments ou la coupe d'un objet. De même comme le propose Siret [SIR1997] pour un modelleur de solutions masques de pare-soleil, pour la construction d'une structure dans l'espace, il invite l'utilisateur à déplacer un plan dans l'espace qui coupe la structure et permet de la visualiser.

Il est important de noter que certaines représentations ne sont pas seulement graphiques, comme par exemple un mode d'emploi pour monter l'objet.

L'avantage d'un modelleur déclaratif est de pouvoir visualiser plusieurs solutions et les soumettre à comparaison. Il est donc essentiel que l'outil le permette au travers d'un gestionnaire de multi vues. Dans le cas d'un grand nombre de solutions, il est intéressant d'organiser les propositions dans un ordre judicieux ne restreignant pas le nombre, mais en facilitant la connaissance au travers d'une pertinence, d'un poids donné à une propriété plus qu'à une autre.

Ces trois «modules» s'opèrent **en cycle**. En effet, la grande agilité de ces modelleurs réside dans leur sensibilité à produire des solutions différentes lors d'une manipulation des intentions même la plus infime.

Bilan sur le modelleur déclaratif.

La description du modelleur présenté ci-dessus est une vision idéale de sa constitution et de son fonctionnement (fig. 9).

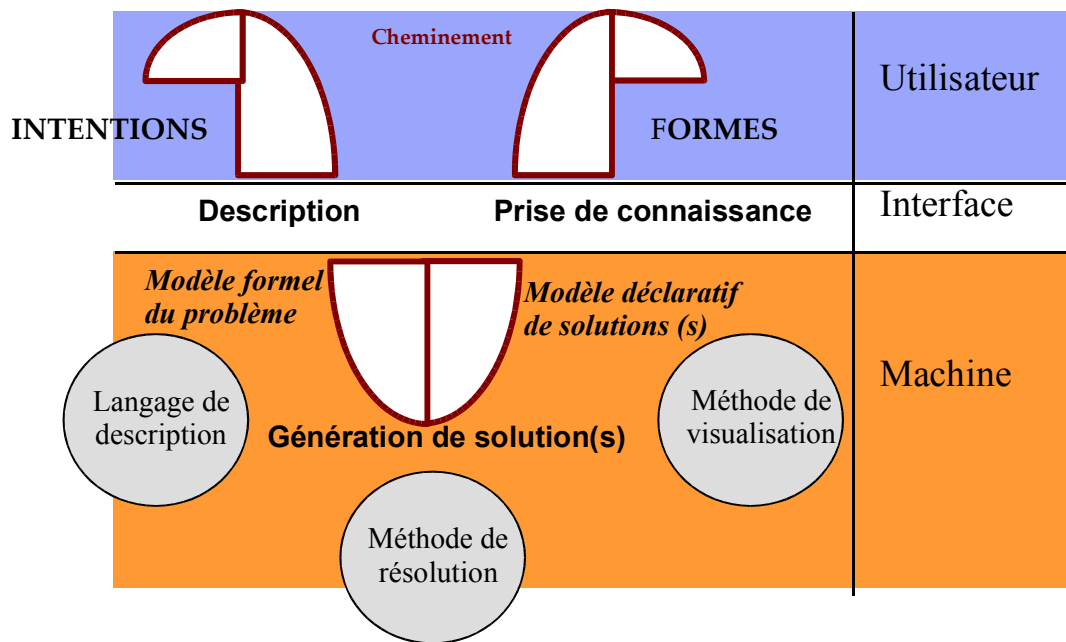


Figure 9. Principe d'un modelleur géométrique déclaratif d'après Siret [SIR1997].

Tous les problèmes ne peuvent pas être traités par une approche déclarative, mais l'ensemble des problèmes qui peuvent l'être est suffisamment vaste pour permettre une grande variété de méthodes à utiliser. Cependant, dans ce type de modelleur résident quelques points faibles :

- la difficulté de l'utilisateur à exprimer précisément la solution désirée.
- la génération d'un objet compliqué est pour les moment impossible.
- il est impensable et inapproprié de proposer un très grand nombre de solution.

Il est important de développer des modelleurs déclaratifs sur des problèmes dont la solution est calculable aujourd'hui. Le modelleur peut devenir une technique de modélisation sous contrainte. Il se comporte alors comme assistant intelligent du concepteur.

Bilan sur les démarches.

Pour conclure, les modelleurs déclaratifs sont une réponse aux limites des modelleurs traditionnels. Ils sont composés de trois modules. Le module de description dialogue avec l'utilisateur, le module de génération produit des solutions présentées par le module de prise de connaissance.

Ces modelleurs sont diversement accueillis au niveau scientifique. En effet, certains prêchent pour l'usage de modelleurs génériques ou traditionnels et d'autres aux contraires tentent de résoudre des problèmes pratiques.

La modélisation déclarative n'est pas une technique à proprement parler mais une approche, à ce titre elle utilise d'autre technique, synthèse d'image, résolution de contrainte, simulation, intelligence artificielle... Dans le cadre de notre travail, il est important de vérifier si les principe de modélisation déclaratives d'applique facilement à la modélisation de structure.

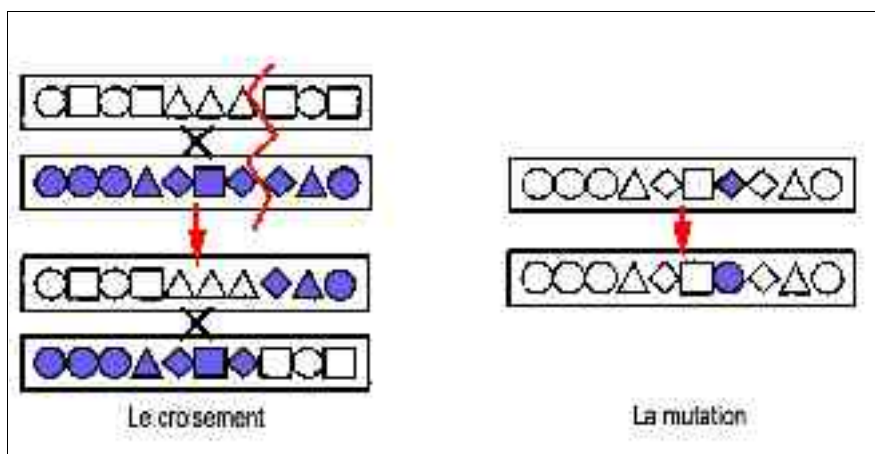
3.1.5 Quelques outils en expérimentation.

Les quelques outils, intégrant une démarche inverse, en expérimentation actuellement, sont principalement développés depuis une quinzaine d'années autour des ambiances architecturales et urbaines dans le laboratoire CERMA de Nantes.

Le parcours.

Dans sa thèse [MOU1998A], Mounier démontre l'utilité de la démarche inverse pour **l'analyse des ambiances dans le paysage urbain**, au travers d'une réflexion sur la constitution d'un outil de construction automatique de visite. Les techniques généralement utilisées en robotique se révélant inadaptée pour la prise de connaissance d'un objet par le parcours, il a développé ses recherches vers une démarche inverse.

Mettant en place une visite virtuelle qui simule le comportement d'un habitant virtuel oisif plongé dans des ambiances architecturales et urbaines existantes ou projetées, cet outil est basé sur des algorithmes génétiques³ très souples augmentés par la connaissance qu'il a croisé avec la *rhétorique habitante* de Augoyard. Ces algorithmes sont employés pour **générer des objets, dans notre cas des parcours**, devant répondre à des contraintes complexes. Rappelons qu'un algorithme génétique gère un ensemble d'objets appelés *individus* [MOU1998B]. Toutes leur caractéristiques sont innées et codées dans leur chromosome, lui-même constitué d'une suite de *gènes*, chacun codant une caractéristique particulière de l'objet. Par croisement d'individus, les gènes des objets sont alors altérés et mélangés produisant des enfants légèrement moins adaptés de leurs parents mais aussi des descendants bien meilleurs qui transmettent les gènes. L'algorithme génétique possède deux opérateurs : le croisement et la mutation (fig. 10). Par un bon usage des ces opérateurs, un tel algorithme converge vers des individus meilleurs. En effet, la sélection des gènes les mieux adaptés élimine les gènes défavorables et favorise donc la propagation des plus intéressants que le croisement mélange et transmet aux générations suivantes. Les nouvelles propriétés sont introduites par mutations qui font apparaître des individus nouveaux. Selon Mounier [MOU1998B], les deux difficultés des algorithmes génétiques consistent, d'une part à trouver des gènes qui codent intelligemment les caractéristiques des objets à produire, d'autre part à trouver des opérations de croisement et de mutations compatibles avec ces gènes.



³ Les algorithmes génétiques représentent une technique prometteuse d'intelligence artificielle. Ils sont utilisés pour la recherche et l'optimisation de solutions. Ils s'inspirent des mécanismes génétiques naturels comme le souligne David E. Goldberg dans son ouvrage *Les algorithmes génétiques*. (Édition Addison-Welsey, 1994)

Figure 10. Les deux opérateurs des algorithmes génétiques: le croisement et la mutation. [MOU1998B]

Le parcours s'effectue dans une maquette numérique qui permet une prise de connaissance de manière naturelle grâce à ces algorithmes. En effet, en offrant la possibilité à l'utilisateur d'évaluer les lieux traversés et les ambiances attendues, l'outil proposé va au-delà des capacités des logiciels existants de génération de parcours, qui sont fastidieux et assez peu automatisés. D'une part, cet outil permet de tester en réalité virtuelle les parcours prévus par les concepteurs d'un lieu (comme par exemple la vérification de sa lisibilité), d'autre part facilite la découverte de parcours ignorés des utilisateurs, qui sont connus pour détourner les objets de l'usage pour lequel ils sont programmés. Cet outil permet donc d'une part, **l'exploration efficace d'un parcours très étendu** et d'autre part de connaître les effets temporels que le déplacement induit sur les sensations du visiteur. Les parcours proposés sont alors meilleurs à chaque exploration, pour finir par se figer en un ensemble stable.

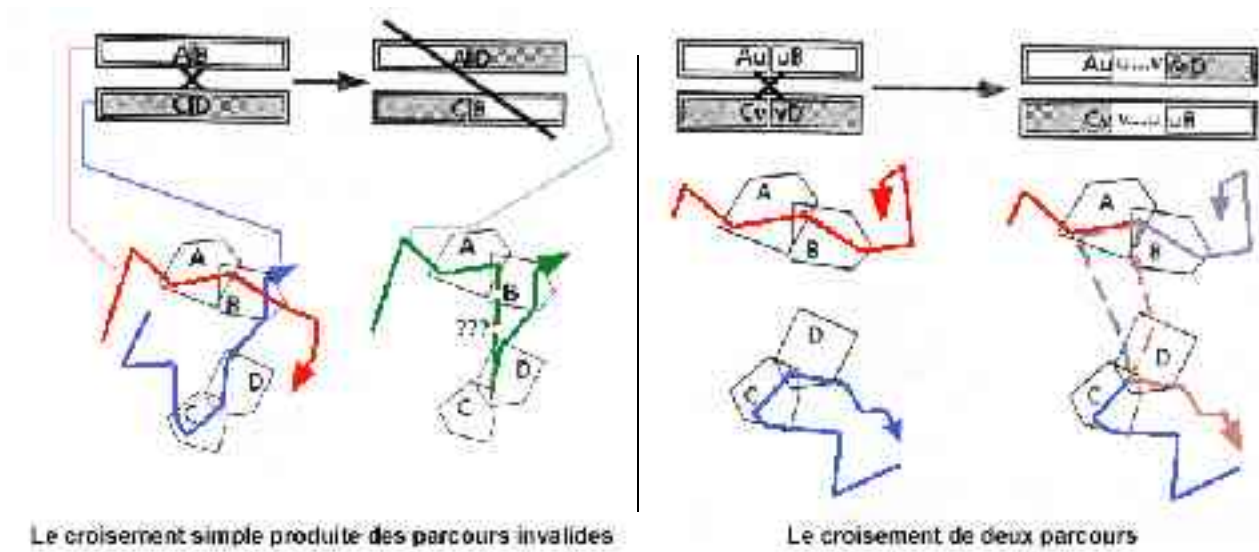


Figure 11. Quelques exemples d'opérateurs d'algorithmes génétiques appliqués au parcours. [MOU1998B]

L'enseillement et la visibilité.

Dans son travail complété ultérieurement par Houpper [HOU2003], Siret mène une étude sur le développement d'un outil fondé sur la simulation inverse pour cadrer **la génération de solutions à partir des intentions d'ambiances du concepteur : ici l'enseillement** [SIR1997]. A la suite d'une analyse sur la démarche inverse et la forme d'outils qui en sont issus, Siret propose une mise en application sur le phénomène de l'enseillement. Il démontre que tous les problèmes liés à l'enseillement, inverses ou directs, s'expriment comme des problèmes d'intersection entre les objets d'une scène et un volume de rayons solaires. Cette pyramide complexe de l'enseillement est un artefact géométrique qui représente une contrainte spatio-temporelle d'enseillement.

Le problème de l'enseillement se présente alors différent selon la démarche employée. En effet, en démarche directe, on procède par tâtonnement sur le dimensionnement de la baie afin d'obtenir une zone d'enseillée ou d'ombre souhaitée à un instant donné (fig. 12). Par une démarche inverse, on pose le problème avec comme postulat une zone d'ombre ou d'enseillement à un instant donné et on recherche la dimension de la baie qui la permet.

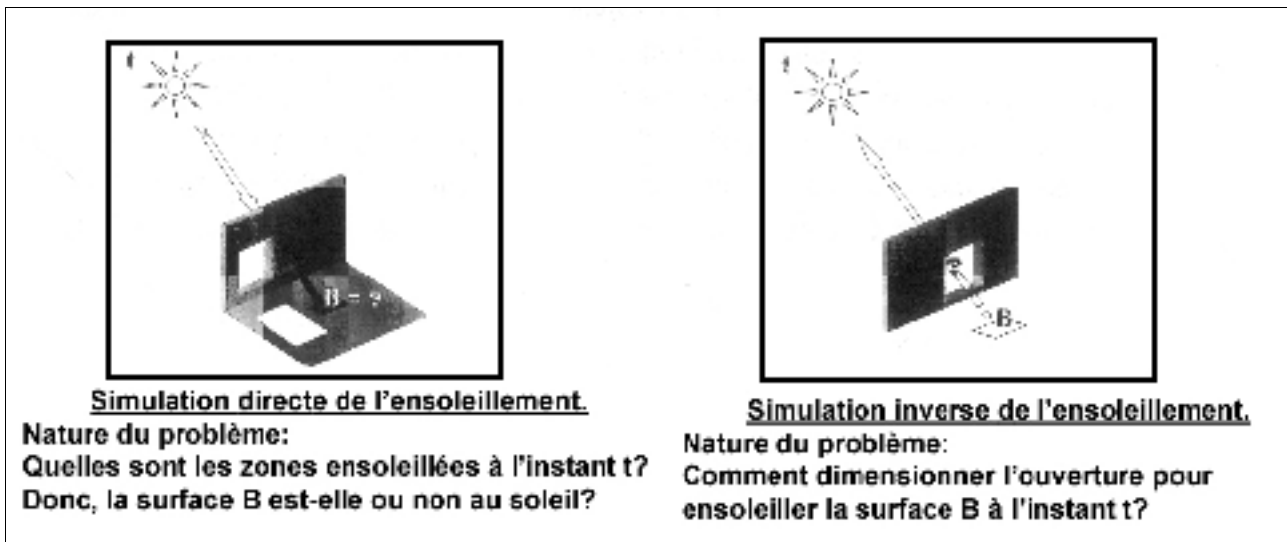


Figure 12. La mise en place du problème de l'ensoleillement dans le projet architectural.

En exploitant la somme de Minkowski, Siret apporte une solution à la délimitation de cette contrainte, alliant géométrie de l'ensoleillement et outils de morphologie mathématique. La solution proposée est d'ordre générale, c'est-à-dire qu'elle n'implique pas de spécification de mise en œuvre, mais est le résultat de la prise en compte du contexte.

Les solutions sont produites par une exploration graphique interactive : **dynamique et**

intuitive, puisque les formes apparaissent au fur et à mesure des transformations du plan d'exploration. Les solutions se présentent sous forme brute (fig. 13, correspondant à l'interaction exacte entre la pyramide de l'ensoleillement et le plan d'exploration).

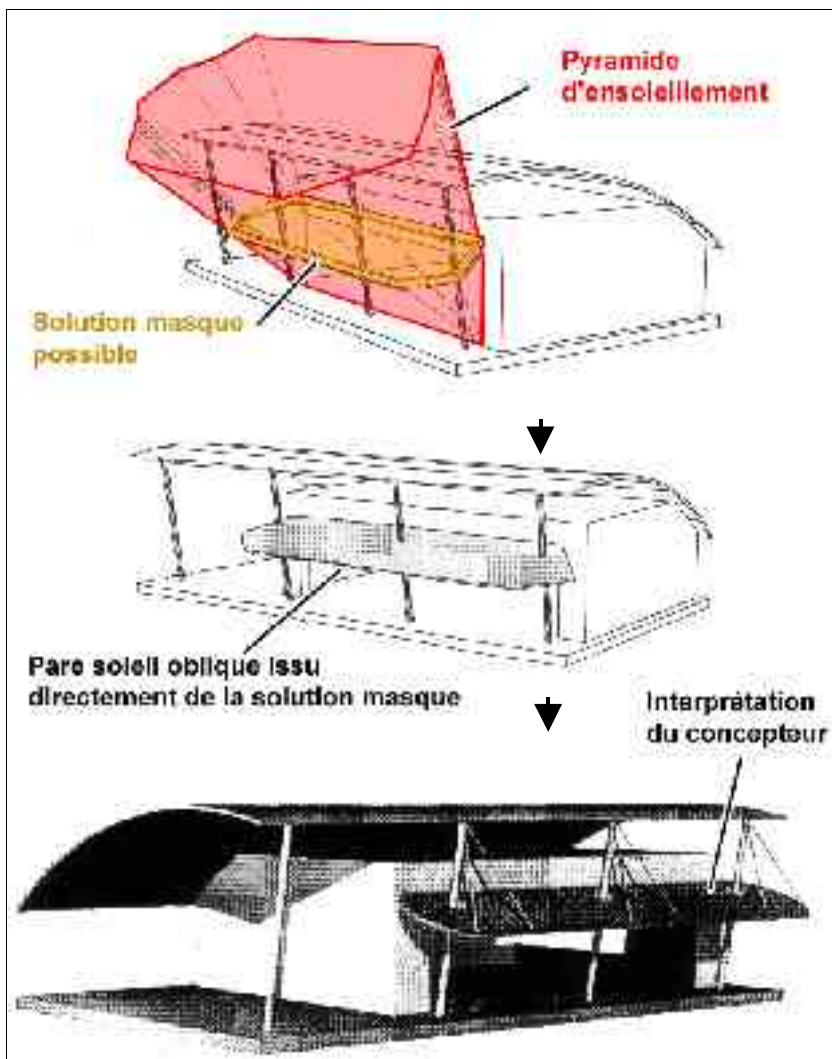


Figure 13. Solution masque possible pour que la baie soit à l'ombre un après-midi d'été. Sont représentées la solution brute et une interprétation du concepteur possible. [HOU2003]

Elle sont brutes car dépourvues à priori d'une signification particulière dans le contexte de projet et représentent des objets « insensés », dans la mesure où la signification qu'ils portent dans le projet ne dépend que de l'interprétation du concepteur.

A partir de ce travail sur l'ensoleillement et un autre similaire sur l'accessibilité visuelle dans le projet architectural, urbain ou paysager de Nivet [NIV1999], Houppert développe un outil de simulation inverse capable de cadrer la génération de solutions architecturales à partir d'intentions d'ensoleillement et de visibilité. Basée sur des supports graphiques (AutoCad), la modélisation inverse des volumes de contraintes solaires et visuelles donne des réponses optimales aux deux problèmes.

Bilan.

On constate donc qu'il est possible de développer des outils d'aide à la conception applicables dès les premières esquisses du projet et en accord avec le processus de conception. Ils proposent des solutions répondant aux intentions du concepteur à un moment donné et dans une forme qui peut encore évoluer, être interprétée, être affiner, en concordance avec le principe de réduction d'incertitudes du projet.

Les deux exemples présentés sont sensiblement différents, non pas dans la démarche, mais dans le support de l'étude et dans la méthode de générations de solutions. D'une part, le parcours est une notion peu concrète, alors que la question de l'ensoleillement amène des solutions physiques : solutions masques (fig. 13). D'autre part, dans un cas on emploie un algorithmes génétiques pour produire des solutions et dans l'autre on fait appel à un langage de modélisation 3D. Aux vues de l'objet de notre problématique, la structure, on se rapproche d'avantage de la problématique de l'ensoleillement.

Le point essentiel dans le fonctionnement et la maniabilité des modeleurs déclaratifs est l'intervention graphique. Les solutions apporté par la question de l'ensoleillement, sont proposées volumétriquement et donc sont plus en accord avec l'univers de travail des architectes où le dessin a une place considérable.

3.2 Sémantique du mot « structure ».

Afin de bien comprendre l'objet de la recherche, il est essentiel d'élaborer une définition de la notion de structure. L'analyse de cette notion se fera au travers de sa sémantique et de l'étude des principes qu'elle induit.

3.2.1 Les origines du terme.

Le mot « structure » exprime un concept qui existe depuis que les hommes ont commencé à bâtir. Très tôt, ce terme a une connotation constructive. Sa sémantique faisant l'objet de peu recherches, il subsiste quelques imprécisions. Cependant, lors du séminaire « Morphologie structurale » [MOT1992], la question de la signification du terme *structure* a été abordée. L'origine latine de ce mot est « *struere* » et signifie « construction ». Employant cette signification dans son *Traité sur l'Architecture*, Vitruve décrit le terme *structura* comme une maçonnerie de brique ou de pierre et de mortier. Dans les différentes traductions du Chapitre III du livre II, on constate un désaccord entre les traducteurs autour du mot *structura* : en effet Perrault [VIT1684] traduit par **structure** ce que Dalmas

[VIT1979] interprète par **construction**. Cette ambiguïté entre les termes structure et construction est encore présente dans le langage de tous les jours. Dans son article « Structure, construction et architectonique » [KEP1967], Kepes se confronte à cette ambiguïté et propose de clarifier les deux termes au travers d'une simple phrase où il remplace l'un par l'autre : « la structure de la population » et « la construction de la population ». Ainsi chaque terme donne un sens bien particulier à la phrase.

Ainsi, nous employons le terme construction pour résultat d'une activité consciente, celle de *construire*, alors que le terme structure ne suggère pas directement l'activité de *structurer*.

En analysant plus précisément l'historique du mot appliqué à l'architecture, on peut dire qu'il ne désigne pas seulement une maçonnerie inerte, mais l'ensemble de l'édifice avec ses propres règles (d'ordre mécanique et fonctionnel) et donc est étroitement liée avec la pensée architecturale.

La première véritable étude conduite sur la science de la construction est menée par Viollet-le-Duc. Il propose un modèle basé sur la distinction entre la forme et la structure au travers de l'étude de la construction et de la structure qui régit les dispositifs formels et décoratifs de l'architecture gothique [VIO1978]. Il fournit les premiers pas vers une analyse structurale en architecture au delà du point de vue strictement descriptif. Le phénomène structural y est apparenté à un système et donc à une organisation ordonnée d'unités constructives, plus seulement une coordination de formes de valeurs égales. Ainsi la signification de structure serait dans le système lui-même.

Cette perception en terme de système ouvre des perspectives issues de la mise en commun du langage architectural et de celui des constructeurs. Apparaissent alors les concepts de système, de forme et de structure de façon plus approfondie proposant comme voie de recherche la conception de structure par la morphologie.

3.2.2 La structure est un système.

S'appuyant sur les travaux de Delattre [DEL1976], on peut définir la notion de système de façon très générale comme « un ensemble d'éléments qui agissent les uns sur les autres et probablement avec l'environnement externe ». Le comportement d'un élément est lié au rôle qu'il joue dans le système, c'est-à-dire ses propriétés.

Les propriétés propres à chaque élément du système, qu'il soit matériel ou abstrait, relèvent de caractéristiques de types quantitatifs ou qualitatifs. Les entités deviennent alors modifiables par la variation des données quantitatives de tous ou de certains éléments, et transformables par la disparition ou l'apparition de caractéristiques qualitatives.

Le concept de structure est indissociable de la notion de forme comme le témoigne la définition du Larousse : « ensemble organique de formes qui, selon quelques psychologues est perçu directement avant que chaque détail soit isolé ». Le concept se présente alors clairement sous la notion d'une totalité et de ses pièces, ce qui peut être apparenté à la notion de système.

D'après Motro [MOT1992], la référence aux propriétés liées à la forme pour décrire une structure porte un poids considérable mais n'est pas suffisant. Il organise la liste des contraintes et des paramètres de conception dans le cadre des problèmes structurels en quatre familles (fig. 14):

- La « **structure** » : au sens de regroupement de structures apparentées suivant leurs relations topologiques et mécaniques. Le classement des structures naît de la détermination des caractéristiques de chaque élément et leur regroupement suivant leurs similitudes.

- La **forme** : projection de toute la structure dans l'espace géométrique.

- Les **forces** : composant de toutes les notions mécaniques liées à la conception des constructions (actions, efforts et contraintes,...)

- Le **matériau** : propriétés mécaniques et physico-chimiques, étude du comportement...

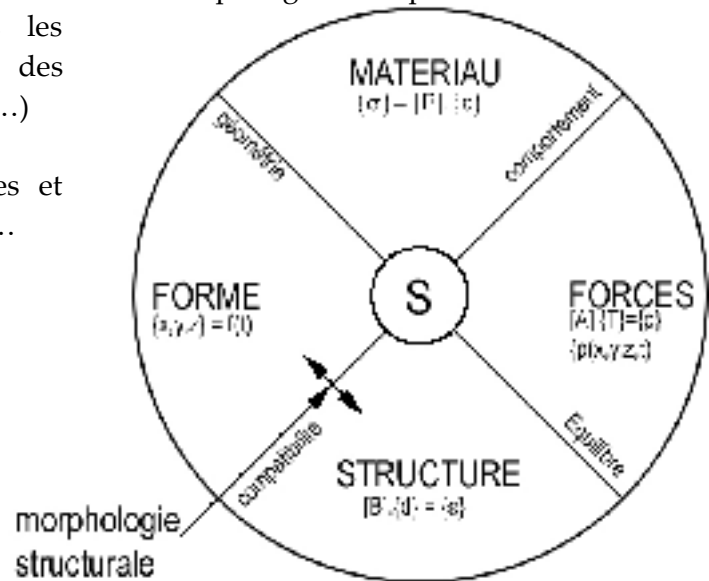


Figure 14. Les quatre familles de paramètres pour un système [MOT1992]

Cette représentation n'est en rien exhaustive, à ces familles de paramètres d'autres peuvent se décliner comme la disponibilité technologique ou le facteur économique.

Bilan.

A la suite de cette analyse du terme « structure », nous avons constaté que cette notion s'enveloppe d'une certaine ambiguïté entre *structure* et *construction*. Ce concept est une notion complexe apparentée, selon Motro [MOT1992], à un système. A ce constat, s'ajoute celui établi auprès de quelques professionnels au travers d'entretiens (cf. partie II et annexes), qui révèle une liaison étroite entre la définition de structure donnée et le principe de point de vue. La difficulté de formuler une définition persiste. En effet, les ingénieurs s'attachent plus au comportement mécanique et l'identifient donc à un système, tandis que les architectes s'attachent d'avantage à sa matérialité, sa présence.

3.3 Modèles et outils de détermination existants.

Afin de comprendre l'enchaînement entre la notion de structure et les modèles de détermination qui en découlent, il est essentiel de bien cerner qui les utilise, dans quel(s) but(s) et quels sont les aspects étudiés. Le plus généralement employés par les ingénieurs-structures, de nombreux modèles sont disponibles et certain induisent des outils disponibles aujourd'hui.

Pour comprendre le bien fondé de leur existence, il est essentiel de comprendre la nature de l'analyse effectuée et ses objectifs.

L'objet de leur analyse se cible sur deux aspects de la structure étudiée plus ou moins prépondérant suivant le contexte, c'est-à-dire le choix de donner plus d'importance à l'un ou l'autre dépend de la nature de l'objet :

- L'état limite ultime dans lequel sont étudiés la **résistance**, au travers des contraintes maximales admissibles, et l'**instabilité**, au travers des flambements.
- L'état limite de service dans lequel est étudié la **rigidité** au travers des déformations acceptable du point de vue visuel et fonctionnel.

Cette analyse est menée afin de parvenir au **dimensionnement**, c'est-à-dire la dimension optimale à donner à une pièce par l'ingénieur et suivant les réglementations. Ce dimensionnement est ensuite soumis à un contrôle, une vérification, c'est-à-dire l'obtention du degré de sécurité de la structure. La sécurité structurale est validée lorsqu'une structure est conçue de manière à résister à l'ensemble des sollicitations, durant les périodes de montage et d'exploitation et avec une marge appropriée.

Ainsi, dans un premier temps, nous analyserons les modèles, leurs usages et la nature des réponses apportées. Dans un second temps, nous étudierons des exemples d'outils mis à la disposition au travers de l'analyse de leur fonctionnement et du profil de l'utilisateur.

3.3.1 Les modèles de calculs.

Comme le souligne Bouleau dans son article *la modélisation et les sciences de l'ingénieur* [NOU2002], chaque science fait appel à ses propres modèles pour apporter des réponses. Le travail de l'ingénieur-structure repose sur plusieurs modèles dont la pertinence est étroitement liée à la nature de l'objet observé : type de structure, étape de conception...

L'ingénieur est responsable du choix de son modèle. En effet, il a la possibilité d'opter pour un modèle très fin mais d'une grande complexité et qui requière une grande dextérité, ou pour un modèle d'une plus grande simplicité, plus aisé à manipuler puisque nécessite relativement peu de mesures, mais qui demeure aussi plus faux. Il n'y a pas de bon modèle en soi, c'est la nature du résultat qui induit le modèle le plus approprié. En d'autres termes, il est nécessaire d'adapter la méthode au degré de définition disponible et souhaité. Dans un grand nombre de cas, un modèle intermédiaire serait le moins mauvais : ni trop simpliste, ni trop perfectionné.

Entre ces deux extrêmes, l'ingénieur dispose de plusieurs modèles allant du très fin au très rustique...

Le modèle microscopique : la matière.

Ce modèle est employé pour étudier la structure à l'échelle microscopique. Cette échelle d'étude renvoie aux lois sur les liaisons atomiques (attraction/répulsion) dont l'observation avoisine le millionième de millimètre. Une étude par le biais de ce modèle fournit une analyse d'une grande précision, où les déformations sont examinées dans le détail. L'ingénieur s'approche au mieux du phénomène. Cependant, le calcul devient impossible au vu de l'échelle de travail (atomique) et donc de l'ampleur des opérations à effectuer. Fort de ce constat, l'ingénieur-structure se tourne plus facilement vers un modèle macroscopique.

Le modèle macroscopique : le mécanique des milieux continus.

La mécanique des milieux continus est une modélisation physique macroscopique. En d'autres termes, on observe la matière à l'œil nu. Cette modélisation est née de l'idée que certains problèmes peuvent être traités à une échelle macroscopique en assimilant cette matière à un milieu continu, comme l'illustre la figure 15. Dans la formulation mathématique classique de ce concept, un système mécanique est représenté par un volume constitué de particules. L'état géométrique de ces particules est caractérisé par la seule connaissance de leur position, assimilable à un point matériel. La perception intuitive de la continuité se réfère à l'évolution du système. Au cours de cette évolution les particules initialement voisines demeurent voisines.

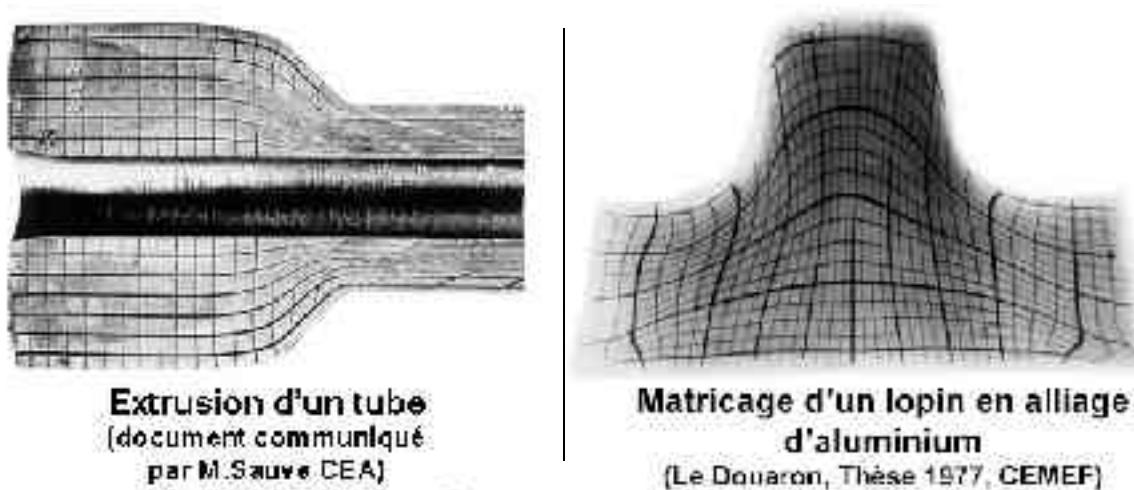


Figure 15. Observation de la déformation d'un solide par une opération de formage à froid ou à chaud [SAL2004].

Le concept de milieux continus est une modélisation issue de l'expérience courante dont la pertinence est avérée selon les problèmes abordés et en fonction de l'échelle des phénomènes mis en jeu. Le support de l'étude d'un ingénieur-structure mêle des échelles différentes. En effet, il travaille sur des éléments dont la dimension caractéristique va du mètre au centimètre (fondations, un bâtiment, un pont, un barrage...) qu'il confronte à des problèmes de stabilité de matériau et de sol dont les composants sont de l'ordre du millimètre ou du dixième de millimètre. Cette différence d'échelle exclut l'usage d'une modélisation à l'échelle atomique mais peut admettre une modélisation macroscopique comme celle des milieux continus.

Le modèle simple : la résistance des matériaux.

Pour comprendre les fondements d'une modélisation, il est important de se questionner sur l'objet de cette modélisation et donc sur les sciences qui lui sont associées. En génie des matériaux, nous manipulons de la matière et nous faisons appel à la physique, la chimie et quelques disciplines dérivées. Dans son travail, l'ingénieur structure recherche à employer la technique la plus simple et la plus efficace possible. Pour cela, il fait appel à la résistance des matériaux. D'après Bouleau [NOV2003], la résistance des matériaux peut être assimilée une

sciencette, c'est à dire une science de l'ingénieur qui présente un intérêt philosophique particulier par sa structure déductive rigoureuse constituant un corpus cohérent.

Dans ce sens, elle ne désigne donc pas la science de la solidité de la matière qui relève de la physique et qui englobe la mécanique des milieux continus et la mécanique de la rupture. Issue d'expérimentations (fig.16), elle est une approche simplifiée de cette question, élaborée par des ingénieurs, sous une forme assez claire pour être enseignée commodément et être utile au concepteur.

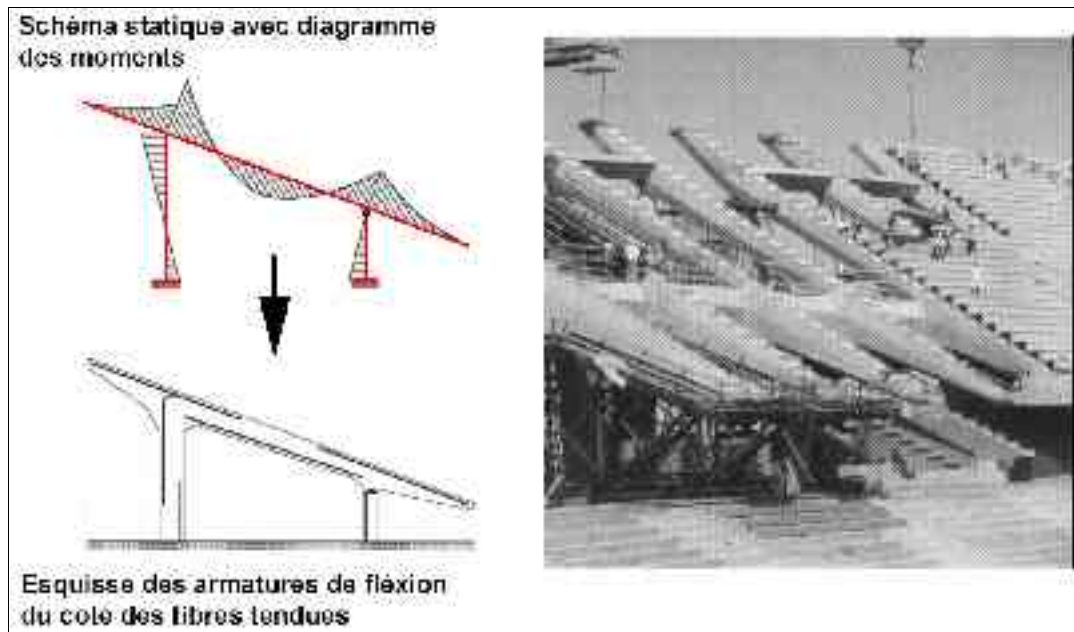


Figure 16. Les connaissances de la résistance des matériaux sont issues de l'expérimentation. (Illustration humoristique de Calvin et Hobbes, reprise par Bouillard [BOU2004].)

Dans la résistance des matériaux, on considère que les structures peuvent se décomposer en éléments, qui se transmettent les efforts par des liaisons et qui se déforment suivant des lois simples, que l'on calcule grâce à des hypothèses simplificatrices (principe de Saint-Venant...) Ce n'est pas une science que l'on peut désigner comme réfutable, mais comme fautive. Elle s'approche de la justesse mais reste toujours employée dans des cas où elle est erronée.

Pour obtenir un résultat, l'ingénieur procède par schémas statiques dans lesquels il identifie les éléments structuraux, les actions, les appuis et les liaisons afin de calculer les réactions. En d'autres termes, il connaît les actions, les dimensions, matériaux et recherche les déformations, les forces internes... Par convention, les éléments sont symbolisés par des nœuds et des barres comme l'illustre la figure 17.

Malgré ce caractère inexact, cette modélisation demeure indispensable pour dégrossir le projet avant de faire des vérifications et des ajustements par des calculs lourds et précis au travers de la mécanique des milieux continus.



Figure

17.

Exemple de schéma statique pour la construction d'une tribune [BOU2004].

Le modèle informatique : les éléments finis.

Cette modélisation associe au modèle des milieux continus des applications à partir de la matière. C'est une méthode de discrétisation. On procède à un maillage qui consiste à recouvrir le domaine à l'aide d'éléments géométriques, de manière aussi fidèle que possible, comme une sorte de triangulation. Ce maillage permet d'effectuer l'étude sur chaque élément. Par l'application des conditions d'équilibre et des lois de comportement mécanique, sont construit des équations approchées dont les inconnues sont les valeurs de la solution en un ensemble bien choisi de points, appelé les nœuds de discrétisation.

Par cette technique, il est alors facile d'obtenir une simulation numérique du comportement de la structure. Cette simulation réaliste peut exiger des centaines de milliers de nœuds et d'éléments. Cela conduit à un système à résoudre très vaste et nécessitant l'emploi d'ordinateur. Le développement de technique efficace pour le choix des points de discrétisation (maillage adaptatif) et la résolution des systèmes sont deux aspects très importants de la recherche actuelle (fig. 18).

Ce modèle est facile à mettre en place, cependant la maîtrise des enjeux structurels demeurent difficiles à démarquer et demande un savoir-faire considérable. Très fiable, cette technique ne prend cependant pas en compte les imperfections des matériaux.

Ce modèle peut s'appliquer à d'autres domaines comme la thermique, l'acoustique ou encore la mécanique des fluides.

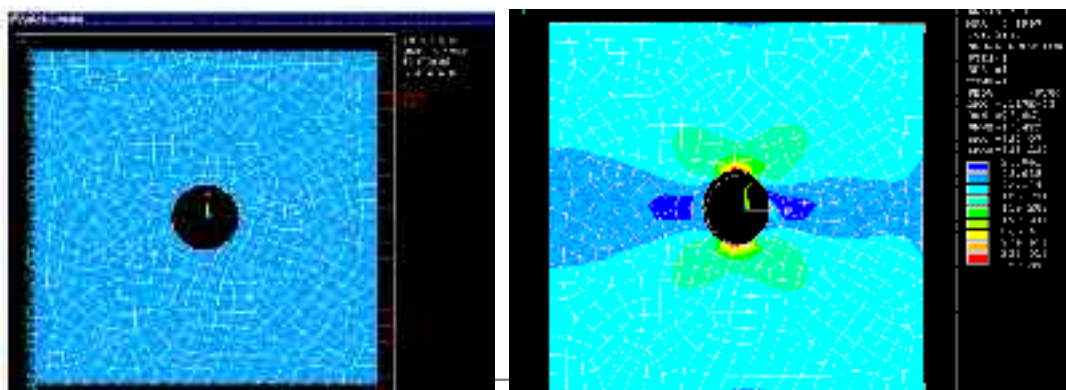


Figure 18. Résolution par la méthode des éléments finis d'un problème de statique : maillage d'une plaques percée. [BAV2004].

La statique graphique.

D'après les travaux de Pirard [PIR1967], la statique graphique est un modèle de détermination qui a pour objet la résolution par le dessin des problèmes de la statique. Il est caractérisé par le fait qu'à partir d'un petit nombre de données et de principes, on obtient des résultats sous forme graphique, extrêmement féconds en pratique, et un très grand nombre de moyens de résoudre des problèmes structurels variés. Le résultat ainsi porté à connaissance est d'une grande clarté.

Le domaine d'application de ce modèle reste limité à celui des forces situées dans un même plan ou symétrique deux à deux à celui-ci.

Par le rapport forme/force, il apporte un ensemble de réponses, manipulables graphiquement, et qui demeurent d'une grande sûreté et avec un minimum de paramètres connus : types d'appuis, distances à franchir, forces appliquées... Bien que le calcul apporte une grande exactitude de résultat, la méthode graphique apporte des résultats garantis à quelques pourcents près, mais qui sont plus que suffisants dans une grande majorité des cas. Ce modèle s'adapte assez bien dans le cas d'hypothèses ou énoncés peu précis. Cette méthode permet un bon contrôle vis-à-vis des solutions puisque d'une part, la mesure graphique des solutions est plus évidente et d'autre part, elle fait apparaître les erreurs grossières pouvant passer inaperçues par le calcul.

Ce modèle se base sur quatre axiomes fondamentaux (fig. 19), le théorème des glissements de force et la notion de fils et de barre articulés de la résistance des matériaux.

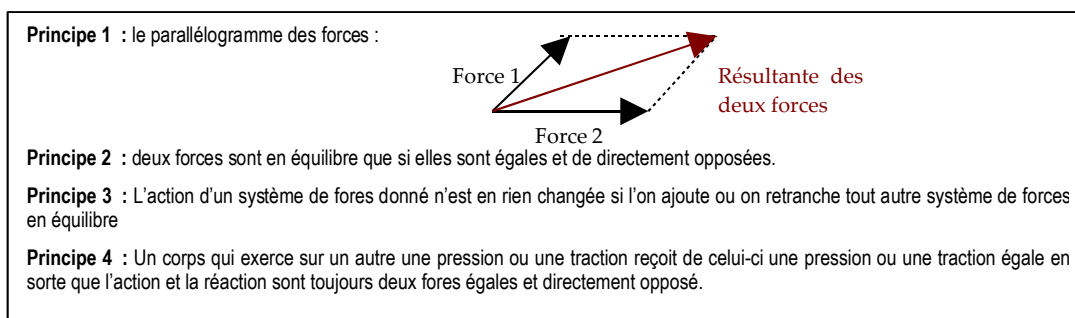
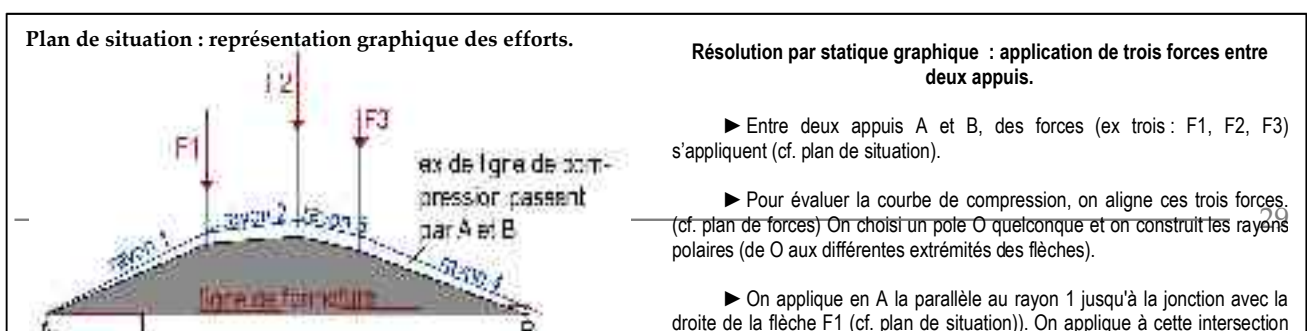


Figure 19. Les quatre principes fondamentaux de la statique graphique d'après Pirard [PIR1967].

Elle fait appel à l'aptitude de l'utilisateur et nécessite une grande rigueur dans le dessin pour garantir la fiabilité du résultat. Elle permet la manipulation d'une courbe funiculaire qui correspond à une courbe exclusivement en compression réagissant à des forces appliquées entre deux appuis. Sa manipulation permet d'obtenir la forme souhaitée. (fig. 20)



► On trace alors la ligne de fermeture passant par A et par l'intersection de la parallèle du rayon 4 et la verticale passant par B. (Cf. plan situation).

► On fait passer par le pôle O une parallèle à la ligne de fermeture (cf. plan de forces). On trace alors la parallèle à (AB) passant par l'intersection de la droite des forces et la ligne de fermeture.

Plan de forces : dynamique.

► La droite ainsi obtenue est la droite qui permet d'obtenir l'ensemble pôles donnant des courbes de compression passant par A et B répondant au trois forces de départ.

► On peut alors choisir sa courbure en jouant sur l'emplacement du pôle sur cette droite : plus on s'éloigne des flèches, plus les charges sont grandes et l'arc petit ; plus on s'approche, plus les charges sont petites et l'arc prononcé

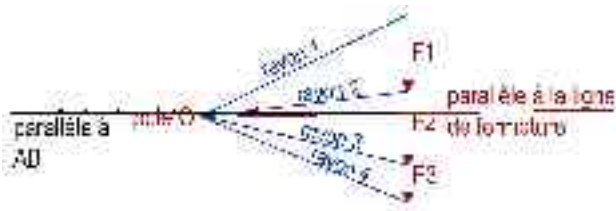


Figure 20. Exemple de résolution d'un problème de statique par statique graphique.

Ce modèle est donc un soutien intéressant afin de dégrossir le problème et nécessite l'utilisation de méthode de calcul pour un approfondissement et un affinage des solutions.

Bilan.

Pour résoudre un problème, tous les modèles ne se valent pas, ils font appel à différents registres. Cependant, certains remportent mieux l'adhésion de l'autre. Cette préférence est issue de la confrontation et l'ajustement du modèle avec son utilisateur et ce qui doit représenter : c'est-à-dire sa validité. Ces modèles ne restent jamais qu'une approche parmi d'autres, une lecture de la complexité rencontrée. En cela, chaque modèle est réfutable.

L'objectif est donc non pas d'atteindre la vérité, mais bien de faire que des situations complexes enfantent des solutions et donc conduit à choisir le modèle approprié dans le contexte donné.

3.3.2 Les outils existants.

L'ensemble des différents logiciels mis sur le marché, comme outil d'aide à la conception de structures, sont basés sur la modélisation des éléments finis et s'adressent presque exclusivement à des ingénieurs-structures.

Les outils disponibles sont très semblables entre eux. Au travers de l'analyse de deux logiciels, *Robot Millenium* et *ICAB Force*, couramment utilisés par les ingénieurs, nous tenterons d'en élaborer les avantages et les limites, ainsi que leurs apports vis-à-vis du processus de conception.

Robot Millenium, développé par ROBOBAT.

Robot Millenium représente un des logiciels les plus répandus auprès des bureaux d'étude technique. Il permet de modéliser tout type de structures sous diverses analyses. Son fonctionnement reste assez simple pour les utilisateurs visés, puisqu'il reprend les principes manuels de calcul de structure, bien connus des ingénieurs.



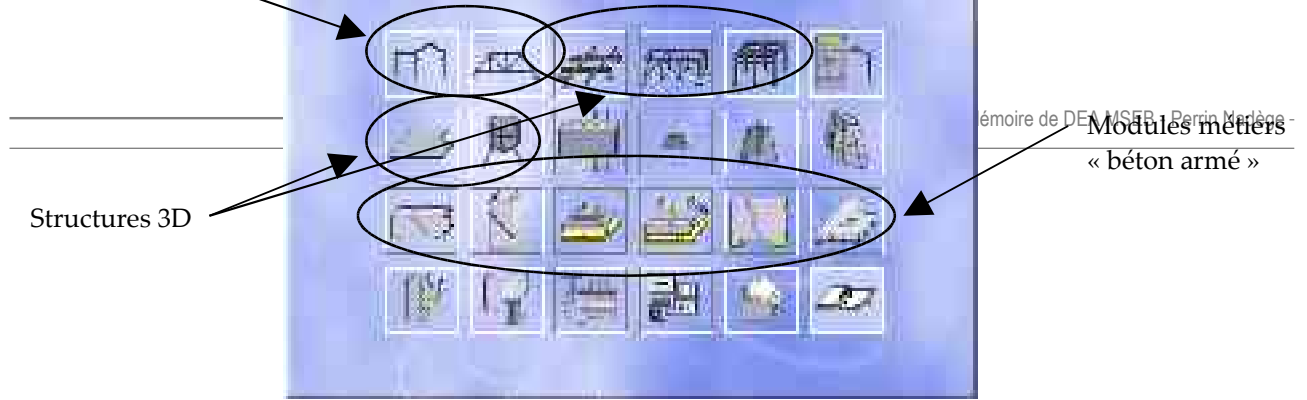


Figure 21. Capture d'écran de la première fenêtre dans Robot Millenium : menu de choix des typologies d'étude et module.

Restant sur une symbolique familière 2D et 3D des systèmes porteurs, le choix de l'étude est proposé par une icône dans un menu « étude et module » (fig. 21) dans lequel l'utilisateur choisi par avance la catégorie constructive de sa structure : éléments linéaires (barres, poutres, câbles), des éléments surfaciques (plaques, coques), des panneaux orthotropes, des éléments volumiques.

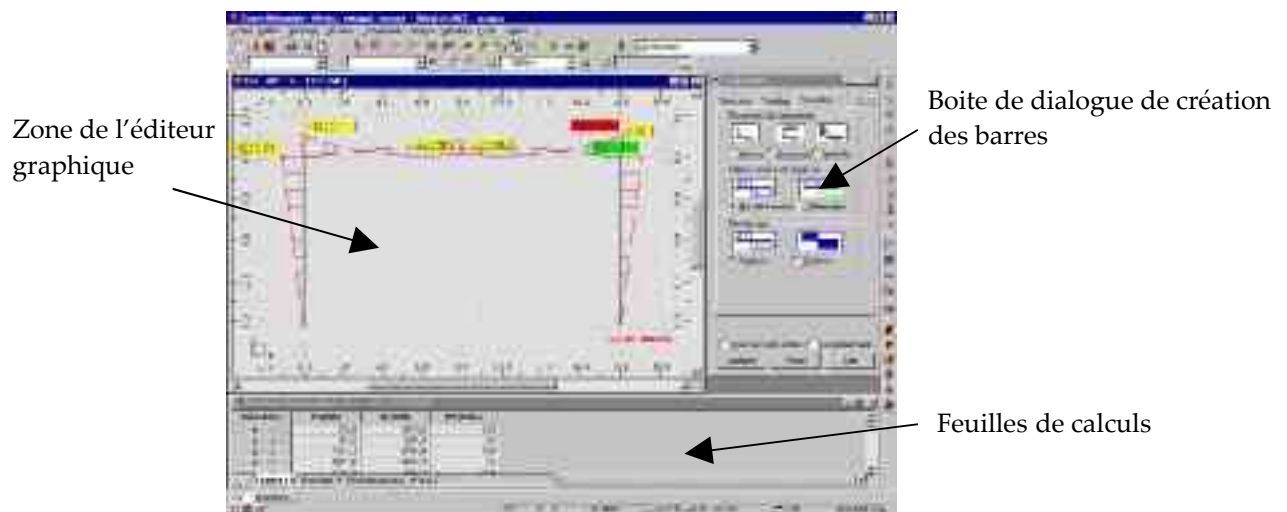


Figure 22. Capture d'écran d'un espace d'analyse : exemple sur un portique.

La seconde fenêtre (fig. 22) est sous la métaphore d'une planche à dessins où l'utilisateur représente sa structure sous forme de barres et de nœud. Par une feuille de calcul mise en parallèle, sont indiqués les caractéristiques de la structure : matériaux, sections...

Cet outil permet de soumettre la structure à différentes analyses : statique linéaire, statique non linéaire, flambement généralisé, analyse modale, analyse sismique, analyse spectrale, analyse harmonique, analyse temporelle non linéaire, calcul par phase, analyse élasto plastique 2D et 3D... Ces vérifications sont donc très complètes mais demandent une grande maîtrise des concepts manipulés, familiers des ingénieurs mais qui restent encore assez éloignés du langage des architectes.

ICAB Force développé par ICAB.

ICAB Force propose un calcul de structure par la méthode des éléments finis. Ce logiciel s'applique à toutes les structures tridimensionnelles comprenant des parties formées de poutres, de barres, de liaisons élastiques et de corps rigides. Il propose plusieurs analyses sous forme de chargement : forces, moment, charges réparties sur des surfaces, déplacement imposé, efforts de précontrainte, dilatation thermique... (Fig. 23 et 24)

Figure 23. Exemple d'étude: l'action du vent sur un portique simple. (Source: www.icab.fr)

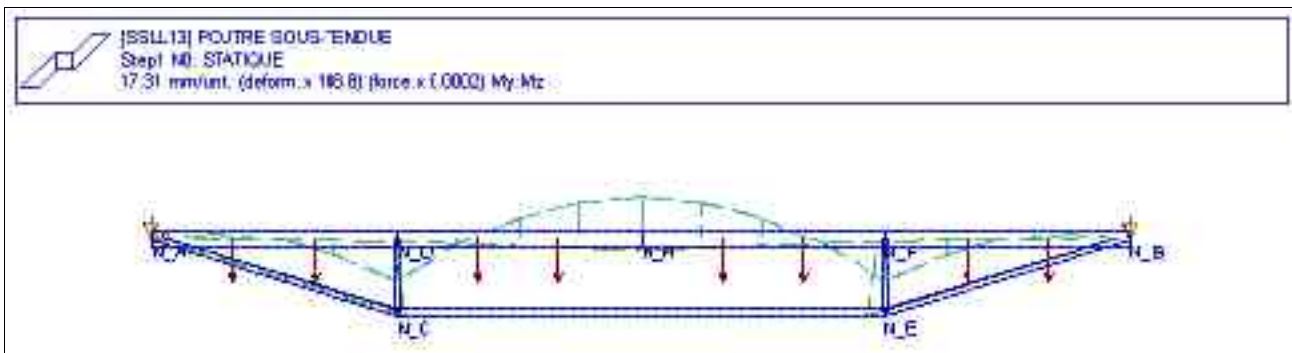
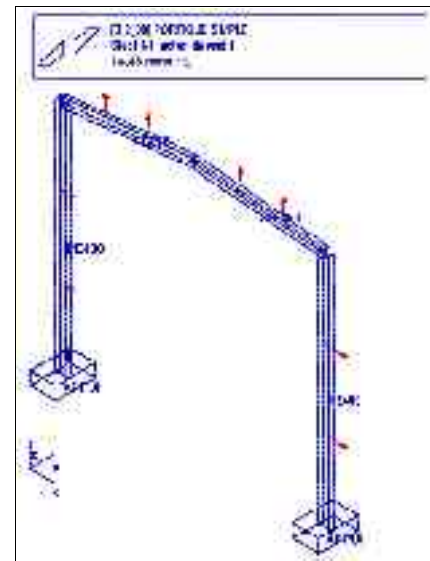


Figure 24. Exemple d'étude de comportement statique d'une poutre sous-tendue. (Source: www.icab.fr)

A partir d'une bibliothèque d'éléments (fig. 25) comme la poutre élancée, courte, barre élastique, l'utilisateur construit la structure à analyser. Les résultats obtenus sont de l'ordre des déplacements en translation et rotation, des flèches, des efforts résultants, des énergies de déformation ou encore un devis.

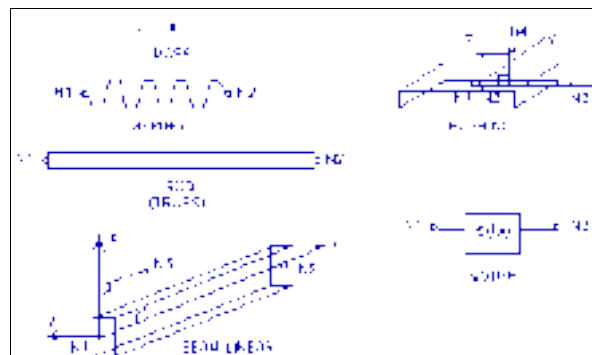


Figure 25. Exemples d'éléments dans la bibliothèque. (Source: www.icab.fr)

Il permet de dessiner graphiquement les propositions structurelles de l'utilisateur par saisie interactive à partir de nœuds, éléments, conditions limite et chargement, matériaux... L'ensemble des résultats est présenté par une feuille de calcul.

Cet outil est donc assez similaire au précédent. Il propose diverses analyses statiques et mêle représentations graphiques et tables de calculs.

Bilan.

Se basant sur la modélisation des éléments finis, ces outils ont l'avantage d'être très fiables mais représentent une grande complexité apparente. Cependant cette méthode ne peut pas vraiment être applicable pour la détermination de structure aux premières étapes du projet. En effet, d'une part elle nécessite de connaître beaucoup de paramètres encore inconnus aux débuts du projet, et d'autre part, elle représente une abstraction en terme de projection visuelle. A l'image des autres logiciels de détermination de structures, les deux exemples présentés s'appliquent dans une vision essai/erreur du processus de conception et se présente donc comme des outils de vérification.

Ces outils demeurent indispensables pour le passage du projet à la réalisation, cependant ils n'interviennent que dans un objectif "juste ou faux", c'est-à-dire ne proposent pas de solutions mais vérifient un résultat. Or, il est nécessaire pour un architecte de se confronter aux problèmes de contraintes structurelles dès les premières esquisses du projet. Les propriétés et les intentions liées à la structure sont d'un niveau de précision évolutif au cours du processus de conception : se modifient, s'affinent, disparaissent... Il est donc difficile d'utiliser ce type d'outil comme aide à la conception, puisqu'ils demandent un état très précis et défini du projet.

On constate donc l'absence d'outils adaptés aux premiers pas du processus de conception. Or, leur présence est essentielle afin d'accompagner l'architecte dans sa démarche et de lui donner les moyens de concevoir la structure au rythme du projet, tout en restant dans le domaine du possible, du constructible. Plus qu'un correcteur, cet outil devrait être un outil d'aide à la conception à part entière.

4 VERS DES OUTILS : ANALYSE DES BESOINS

Notre problématique portant sur la question des structures, avec comme piste d'approche la modélisation inverse, il est essentiel de la conforter ou l'amender auprès de praticiens. Pour cela, nous avons réalisé un bref examen des pratiques d'une part auprès d'architectes, et d'autre part auprès d'ingénieurs.

Le recueil de savoirs et de pratiques s'est effectué au travers d'entretiens, guidés par un questionnaire, auprès de quelques professionnels et ayant pour objectif de cibler les données manipulées suivant les étapes du projet, ainsi que le rôle de chacun vis-à-vis de l'exercice de détermination des structures. La résolution du problème étant permise par une mise en commun de deux savoir-faire, architecte et ingénieur, notre prospection s'est opérée dans les deux univers distincts ainsi qu'auprès de praticiens multidisciplinaires (cf. annexes). Par cette méthode empirique, nous souhaitons obtenir des renseignements de l'ordre de l'indice plus que de celui de l'étude exhaustive des pratiques. En effet, à chaque individu sont associées des méthodes de travail particulières, ce qui rend l'ampleur d'une telle étude infiniment grande. Ne remettant pas en question l'intérêt d'une telle prospection, les quelques propos recueillis et les écrits étudiés [TAB1985] nous semblent cependant déjà très enrichissants et prometteurs pour le reste de notre travail.

Cette analyse des pratiques nous a permis de mieux cerner notre problématique. D'une part, nous avons analysé les méthodes de travail et le point de vue des deux catégories professionnelles vis-à-vis du problème de structure, c'est à dire les habitudes, les fonctionnements et les besoins dans le cadre d'un tel exercice. D'autre part, nous avons élaboré des scénarios vis-à-vis des formulations et des formalisations possibles du problème, c'est-à-dire les données d'entrée et les solutions possibles.

4.1 Pratique de la conception technique.

S'appuyant sur les propos recueillis au cours des entretiens et sur l'étude sur *la formation technique des architectes* menée par Tabouret [TAB1985], on tentera dans cette partie de bien comprendre les habitudes de travail des architectes et des ingénieurs vis-à-vis du problème de structures, ainsi que leurs regards respectifs vis-à-vis des outils mis à disposition.

La pratique de la conception technique relève de nombreux facteurs dont le principal demeure la formation des intervenants. L'objet à déterminer, la structure, représente en lui-même un support de travail d'importance différente par rapport à l'ensemble du travail particulier de l'architecte et de l'ingénieur. Le rapport de l'architecte à la technique dans l'exercice du projet et de la maîtrise d'œuvre **ne recouvre ni ne recoupe en totalité** celui que chacun de ses partenaires entretient avec celle-ci. Parmi ces spécialistes, l'architecte collabore avec un bureau d'étude afin de concevoir la structure, qui représente pour les ingénieurs **leur unique objet de travail**.

4.1.1 Regard des architectes.

Dans l'ensemble de son travail de conception, l'architecte s'emploie à satisfaire simultanément à des préoccupations d'usage, des inscriptions culturelles, des définitions formelles, fonctionnelles et techniques d'un espace et met en oeuvre des stratégies d'édification. Ainsi, pour l'architecte, la structure n'est qu'un élément du projet à concevoir.

A première vue, de nombreux architectes semblent assez réticents à se poser la question de la structure de façon très approfondie. En effet, selon Tabouret [TAB1985], ils conservent sur la formation technique une opinion très critique à divers niveaux :

- D'une part, sur l'utilité de la mise en pratique immédiate de la formation technique reçue,
- D'autre part, sur sa portée générale et sa capacité à fournir des éléments de démarche utiles pour guider et assumer des décisions d'ordre technique, se mêlant à d'autres décisions prises en cours de projet.

D'après Pérez-Gomez [PER1983], la division entre les aspects esthétiques et mécaniques de l'architecture s'est graduellement institutionnalisée. Notamment en France où l'architecture était enseignée dans l'école des Beaux-Arts alors que des institutions totalement distinctes se développaient pour la construction et l'ingénierie.

4.1.2 Regard des ingénieurs.

L'ingénieur contribue à la satisfaction des performances spécifiques de l'édifice, par conception et vérification de certaines parties. En effet, le projet est partitionné afin de rapporter les espaces spécifiques à leur scénario d'usage, à leur place dans la disposition d'ensemble et à leur rapport particulier avec leur environnement. Ainsi, travaillant sur un élément du projet, l'ingénieur n'a en soit qu'une intervention limitée et localisée mais essentielle pour la réalisation du projet. Comme nous l'avons développé dans l'état

de l'art, l'ingénieur structure réalise ces tâches par modélisation sous le regard attentif de l'architecte qui veille à la cohérence architecturale et technique du parti retenu et partagé.

Dans les propos recueillis, il ressort deux attitudes que peuvent adopter les ingénieurs vis-à-vis de la conception de structure. Dans l'une, les ingénieurs interviennent comme amendeurs, se contentant de vérifier la faisabilité des structures. Ils interviennent donc seulement à des étapes où le parti architectural est déjà établi (APS, APD, DCE), comme l'illustrent les propos d'un ingénieur, M. Loth :

« On intervient vraiment qu'à partir de la phase APS, APD à partir données de l'architecte. »⁴

Cependant, ils peuvent adopter une autre approche où ils interviennent dès les premiers traits en collaboration avec l'architecte, à la phase esquisse accompagnant l'architecte dans ses choix, comme l'appuient les propos de M. Edwards, ingénieur :

« C'est essentiel de s'engager très tôt auprès de l'architecte. »⁵

Ces deux positions ont inévitablement un impact sur le processus de conception et la formalisation de l'objet, la structure, qui influe sur l'ensemble : le projet architectural. Cependant, il est important de rappeler que le travail de conception de structure est issu d'une collaboration dans lequel le comportement de chacun influe.

4.1.3 Les méthodes de travail.

La mise en cohérence architecturale et technique du parti retenu peut s'effectuer de différentes manières, ce qui renvoie à différents objets conçus. Lors des entretiens et selon Tabouret [TAB1985], il ressort deux méthodes de travail pour la conception d'une structure.

D'une part, les réticences des architectes débouchent, vraisemblablement, sur une justification d'une certaine démission et désresponsabilisation de l'architecte pour les aspects techniques du travail. Or, une telle autolimitation réduit non seulement la portée de toutes interventions architecturales, mais favorise la reproduction de rapport de dominance entre professionnels. En effet, il semblerait que de nombreux architectes se remettent entièrement aux ingénieurs pour concevoir leurs structures. Un tel sacrifice a pour conséquence, plus ou moins acceptée, l'absence de maîtrise d'une partie du projet architectural, comme l'illustrent les propos d'un architecte rencontré, JC. Monjardet, sur le rôle que devrait, selon lui, avoir le bureau d'étude et les limites que cela induit :

« Quand on est architecte ou dans les écoles, on imagine qu'ils [les ingénieurs] vont trouver une solution constructive. Cependant, dans les pratiques, il n'en est rien. Jamais, il n'y a de solutions proposées de la part des ingénieurs. »⁶

⁴ Propos issus d'un entretien avec M. Loth, ingénieur à AIC Ingénierie de Nancy. Propos retranscrits en totalité en annexes.

⁵ Propos issus d'un entretien avec Mitsu Edwards, ingénieur à RFR de Paris. Propos retranscrits en totalité en annexes.

⁶ Propos issus d'un entretien avec Jean-Christophe Monjardet, architecte dans l'agence Mijolla-Monjardet de Nancy. Propos retranscrits en totalité en annexes.

D'autre part, s'il est incontournable de constater cette démission, il a été démontré lors des entretiens qu'une mise en commun des préoccupations et une conception multidisciplinaire permettent une sorte de réconciliation entre les architectes et la conception technique au service du projet, comme l'illustrent les propos d'un ingénieur rencontré, L. Becker:

« Nous avons tout intérêt d'apporter l'ingénierie à l'architecture car si il n'y a pas de distinction entre le projet architectural et le projet technique, cela permet une grande liberté et le projet est plus intéressant. Quand le travail est indépendant, l'architecture est bloquée car les dispositions doivent être validées du point de vue technique. »⁷

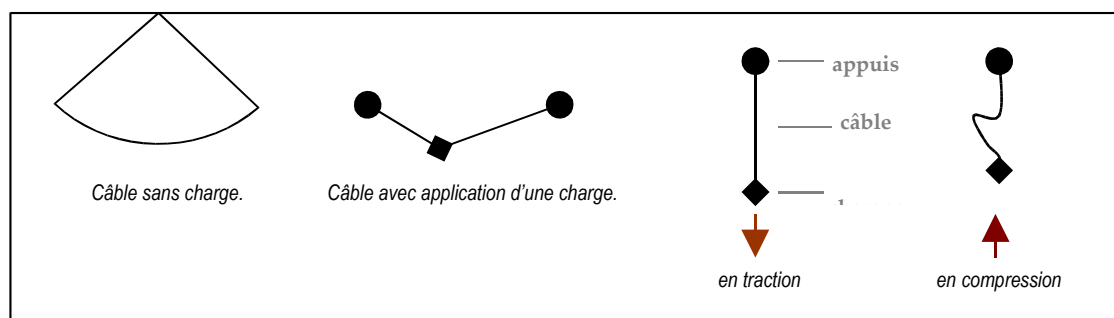
Ainsi, il existe deux méthodes générales pratiquées par les professionnels pour déterminer une structure dans le projet architectural. D'une part, ils peuvent procéder par étapes successives : proposition par l'architecte et mise à validation par l'ingénieur. Ils opèrent en boucle ces actions jusqu'à satisfaction et cela à chaque étape d'avancement du projet. Cette méthode prend du temps et n'est pas au mieux pour le projet, car souvent le domaine exploré reste celui des connaissances de l'architecte en matière d'ingénierie, qu'il reconnaît limitées. D'autre part, ils peuvent procéder par une conception commune et simultanée de la structure qui permet une grande créativité et un plus grand territoire d'exploration en mêlant les deux savoir-faire.

Quelque soit la méthode, l'objectif reste le même, c'est-à-dire réaliser une structure sous diverses formes, plus ou moins abstraites suivant l'état d'avancement du projet, et donc proposer un agencement particulier des contraintes constructives et architecturales.

Dans la pratique, la mise en application d'une ou de l'autre méthode est le résultat de facteurs extrêmement complexes où se mêlent par exemple le contexte économique, le savoir-faire technique, les aptitudes, le comportement de chacun ou encore les habitudes.

4.1.4 Le regard sur les outils.

L'utilisation d'outils de détermination, comme ceux présentés dans l'état de l'art, n'est pas commun à tous. Leur emploi dépend de la formation de l'utilisateur, de son aptitude, de la définition du projet ou encore de la nature de l'objet à étudier. En illustrant les propos de M. Edward sur l'analyse d'un câble, chaque élément a sa propre logique statique qui influe sur le type d'analyse qui sera appliquée (fig. 26).



⁷ Propos issus d'un entretien avec Laurent Becker, ingénieur dans le bureau d'étude et d'architecture MIMRAM de Paris. Propos retranscrits en totalité en annexes.

Figure 26. Exemple de comportement non linéaire : le câble.

En grande majorité, les architectes n'emploient pas d'outil pour la conception des structures. Cette absence peut s'expliquer à divers niveaux comme le décalage par rapport à leur besoin (outil de correction plus que de conception), le manque de formation sur ces outils, la faible maîtrise des notions impliquées, la grande complexité apparente, la nécessité de faire intervenir un bureau d'étude pour les assurances, ce qui encourage une faible prise de risque, ou encore les réticences décrites précédemment.

Dans leurs pratiques, les ingénieurs ne peuvent s'abstenir d'avoir recours à ces outils informatiques. En effet, leur grande précision et leur rapidité de calcul rendent leurs tâches possibles vis-à-vis des exigences et des plannings. Selon l'implication de l'ingénieur dans la conception des structures, l'usage de ces outils est différent.

Dans le cas de l'amendement, ils serviront à vérifier la faisabilité des propositions déjà très définies comme contrôle ou sanction et les modifications apportées ne peuvent être que mineures pour des raisons de planning et de budget. En effet, de trop grandes modifications à un état très avancé du projet, impliquerait de refaire un travail de conception considérable et à différentes échelles.

Dans le cas d'un engagement très précoce, dès l'esquisse, avec l'architecte, les ingénieurs les emploieront comme outil d'aide à la conception technique, comme le soulignent les propos de M. Edward :

« Si on travaille pour une structure pour laquelle le concept est très évident (portique, poteau poutre...), on n'en a pas besoin pour la conception mais juste pour optimisation. Mais si il y a un grand espace à couvrir (30 m par 100), on s'en sert pour explorer les possibles. On utilise alors bien ces logiciels comme des outils d'aide à la conception en procédant par affinage dans le cas de structures complexes: on rentre dans le logiciel une première idée, on vérifie sa faisabilité jusqu'à satisfaction puis on affine. »⁸

Bilan.

Ainsi, si l'état et le fonctionnement des outils actuels de détermination de structure ne sont pas remis en question par les ingénieurs, leur absence auprès des architectes révèle une inadéquation par rapport à leur usage et leur fonctionnement dans le cadre de la conception architecturale. Les architectes n'en attendent pas une validation, qui doit provenir d'après eux des ingénieurs, mais un outil qui les soutiendrait et leur offrirait la possibilité de nourrir leur projet, c'est-à-dire de présenter plus de cohérence entre le parti architectural et les prescriptions techniques choisies.

4.2 Les données.

On appelle données, l'énoncé du problème amenant à la conception de structure. La solution est donc la « bonne forme ». Selon les

⁸ Propos issus d'un entretien avec Mitsu Edwards, ingénieur à RFR de Paris. Propos retranscrits en totalité en annexes.

entretiens et les écrits, ce problème apparaît dès l'esquisse. Dès cette première étape du projet, l'architecte recherche à se positionner dans le « réaliste », c'est-à-dire à écarter les solutions ne répondant pas à ses exigences ou aux conditions initiales.

Les données manipulées ont chacune un statut et une origine différente. Elles peuvent être issues de l'intuition d'un ingénieur, de l'imagination de l'architecte ou encore du contexte. Afin de mieux explorer l'ensemble de ces données, il est important de les replacer dans leur apparition dans le processus de conception et leur position vis-à-vis de la formulation du problème.

Lors des recherches et des entretiens, nous avons pu faire émerger plusieurs données : la typologie, le matériau, les charges et la portée. Ces données sont déterminées ou instanciées par le concepteur à partir de critères techniques ou architecturaux. Il est essentiel de rappeler que si la pertinence de l'émergence de ces données n'est pas remise en question, leur rôle reste variable. En d'autres termes, certaines données peuvent être intentions ou solutions suivant la formulation du problème. C'est dans ce sens que nous proposerons plusieurs scénarios de problèmes possibles pour la conception de structure et nous en préciserons la pertinence dans le cadre du processus de conception architecturale.

4.2.1 La typologie de la structure.

La notion de typologie de structure adopte différentes significations et développements. En effet, il est nécessaire d'établir une distinction entre **typologie structurelle mécanique** et **typologie structurelle formelle**. La typologie structurelle mécanique se réfère aux systèmes mécaniques familiers des ingénieurs, alors que la typologie structurelle formelle traduit les intentions d'espace et de forme de l'architecte.

Suivant la formation de l'interlocuteur c'est l'un ou l'autre type qui prédomine. L'architecte est d'avantage préoccupé par la notion de forme que par la notion de mécanique. Cette dominance intervient sur la formulation du problème. La donnée typologie intervient donc à deux niveaux :

- D'une part, l'architecte peut promouvoir une forme et demander à l'ingénieur de concevoir une structure qui y répond.
- D'autre part, l'architecte peut promouvoir un système mécanique, et lui donner la forme qu'il souhaite.

Aux vues des entretiens, la seconde situation est la plus fréquente : l'architecte a bien souvent au préalable une idée de typologie mécanique quand il dessine une forme.

Ainsi, la détermination de la typologie formelle reste la tâche exclusive de l'architecte alors que la typologie mécanique peut être une intention comme une solution. On parle alors de **typologie structurale formelle comme contrainte architecturale** et de **typologie structurelle mécanique comme contrainte technique**.

Si l'architecte peut facilement imaginer une forme qui répond à ses intentions et que l'ingénieur construit selon ses connaissances techniques. Les typologies mécaniques les plus courantes sont le plus souvent classées selon des critères de forme et/ou de comportement mécanique : Salvadori [SAL1976] les organise par forme et comportement mécanique, Moore

[MOO1999] les catégorise par comportement mécanique (fig. 27) et Paulin [PAU2001] par forme (cf. Annexes).

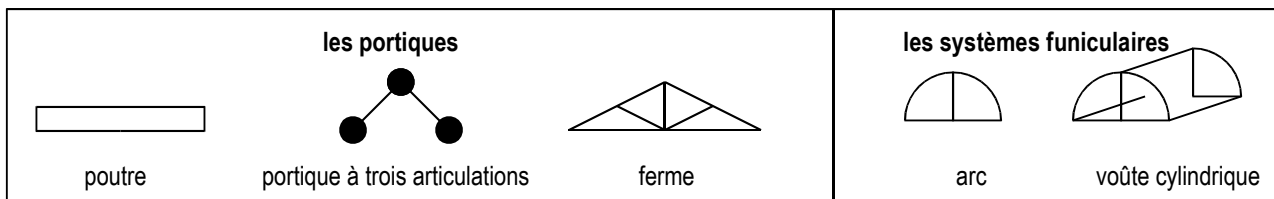


Figure 27. Exemples de typologies mécaniques de structures d'après Moore [MOO1999].

Même si les classifications se présentent différemment, elles représentent un ordre différent d'un même ensemble de structures. En effet, dans chaque classification, nous retrouvons les mêmes typologies mécaniques.

L'intérêt essentiel de classer ces structures est de faire naître une convention de principes structurels commune entre les architectes et les ingénieurs afin de permettre un lien entre la typologie formelle et la typologie mécanique. Ce lien peut prendre de multiples visages. Il n'y a pas de lien idéal mais un lien issu de concessions et d'intentions de la part des deux partis. Comme l'illustrent les propos de l'ingénieur Becker, l'objectif est d'obtenir le meilleur rapport possible en accord avec l'énoncé du problème :

« Parfois dans certaines situations : la forme est acceptée mais la structure est moins efficace, cependant ce choix permet de mieux l'insérer dans le contexte. »⁹

Le choix de la typologie structurelle, qu'elle soit mécanique ou formelle, réduit déjà considérablement le champ des possibles. Par exemple, les matériaux, une autre donnée intervenant dans la formalisation du problème, représentent un ensemble d'« objets » ayant chacun un comportement mécanique différent, plus ou moins plastique, ce qui réduit les solutions possibles par exclusion des impossibilités par rapport à la typologie structurelle retenue.

4.2.2 Les matériaux.

La question de la place du matériau dans notre problématique nécessite de bien préciser l'objet en question. En effet, dans un projet architectural, le matériau est omniprésent, cependant son usage est très variant. Dans notre travail, nous parlons du matériau en tant que matière employée pour construire la structure et non du matériau qui l'environne. De même, il est nécessaire de faire une distinction entre matérialité et matériau. Le matériau s'apparente plus à la matière physique, alors que la matérialité d'un matériau peut se traduire par la présence, la prestance d'une matière.

A l'image des divers partis pris possibles en architecture, le concepteur peut adopter deux attitudes vis-à-vis de la structure. Dans l'une, l'architecte opte pour une structure physique apparente, dans l'autre il considère la structure comme un élément dissimulé qu'il recouvre. Ces deux attitudes influencent le choix du matériau de structure, comme l'illustrent les propos de M. Edwards :

« Le matériau dépend de la vision de l'architecte : si la structure est dissimulée ou visible. Quand elle est dissimulée, l'architecte attend une optimisation

⁹ Propos issus d'un entretien avec Laurent Becker, ingénieur dans le bureau d'étude et d'architecture MIMRAM de Paris. Propos retranscrits en totalité en annexes.

du rapport coût/matière. Quand elle est visible, il peut avoir des approches plus diverses, le matériau peut être l'objet d'un choix postulat/contexte, comme être le résultat attendu. »¹⁰

Si le choix de dissimuler la structure réduit considérablement les approches possibles, il peut y avoir de multiples démarches visant à faire apparaître le matériau de la structure. Par exemple :

- Pour Khan et la plupart des architectes modernes, travailler dans « la nature des matériaux », c'est les immerger dans un rôle fonctionnel, généralement structurel, approprié.
- D'autres concepteurs partagent les idées de Lewerentz. S'appuyant sur son projet pour l'église Saint-pierre de Klippan, il explique que l'on doit construire dans la nature des briques de façon à ce que nous puissions percevoir directement leurs tailles, leurs couleurs et leur texture, plutôt que leurs propriétés structurelles plus abstraites.

La question du rapport dissimulé/apparent dans la structure est une réflexion assez ancienne. En effet, les romains faisaient déjà une distinction entre la structure et son ornement, les comparant à l'homme et à ses habits. Viollet-le-Duc a aussi exprimé dans ses écrits sa position, parlant d'honnêteté de la construction, repris plus tard par Pugin [PUG1841] qui énonce deux grands principes :

« Les deux grandes règles sont les suivantes :

- *Premièrement, dans un édifice, il ne doit subsister aucune caractéristique qui n'est pas nécessaire en terme de commodités, de construction ou de rectitude.*
- *Deuxièmement, l'édifice devra avoir pour tout ornement la construction essentielle. »¹¹*

Ces différents exemples reflètent la grande diversité d'approches, au delà du « simple » choix de faire apparaître ou non la structure. Ce choix naît de la démarche menée par l'architecte et sa volonté à valoriser vis-à-vis du matériau une ou plusieurs propriétés par rapport à d'autres : ses capacités structurelles, sa matérialité : modularité, couleur, taille...

Dans sa démarche, l'architecte peut d'abord choisir parmi des grandes familles de matériaux comme le bois, la brique, la terre, la pierre, l'acier ou encore le béton. Ces familles s'enrichissent au fur et à mesure des avancées technologies, comme avec l'apparition du béton-précontraint, ou de certains plastiques.

Dans la relation des matériaux vis-à-vis de la structure, c'est à dire le rapport dissimulé/apparent, on distingue trois ensembles de matériau (fig. 27) :

- les matériaux à double usages : exemple : brique de parement ou de construction.
- les matériaux de structure: pierre, brique, béton...
- les matériaux de finition : enduit...

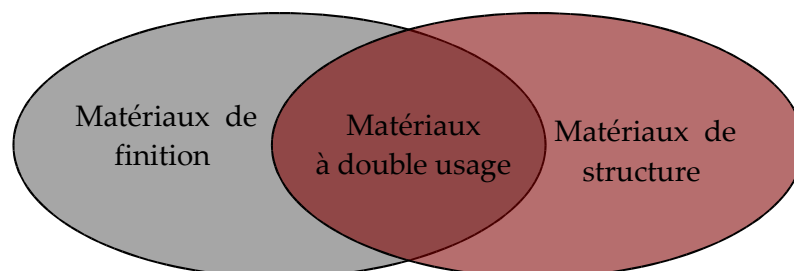


Figure 28. Relation entre les ensembles de matériau vis-à-vis du rapport dissimulé/apparent.

¹⁰Propos issus d'un entretien avec Mitsu Edwards, ingénieur à RFR de Paris. Propos retranscrits en totalité en annexes.

¹¹ [PUG1841] PUGIN (Robert).- The true principles of pointed or Christian architecture, 1841.

Le matériau de structure est donc choisi dans deux de ces familles : les matériaux de structure apparents et les matériaux à double usages.

Ce choix est le plus souvent affiné en collaboration avec l'ingénieur parmi les déclinaisons de ces familles de matériaux en ensembles de matériaux plus spécifiés. Par exemple, pour le bois on peut employer du bois massif, du lamellé-collé, du lamibois, du bois reconstitué, du bois contre-collé ou encore des composites.

La sélection du matériau de structure s'établit suivant divers critères. En parcourant l'ouvrage de Weston sur le lien entre l'architecture, les formes et les matériaux [WES2003], on peut faire ressortir un certain nombre de critères possibles influençant l'architecte dans le choix d'un matériau. Parfois contradictoire, ou éloigné, ces critères sont *pesés* par l'architecte qui leur donne plus ou moins d'importance afin de préciser son choix. Ces critères peuvent être classés en deux catégories : les critères liés à la nature du matériau (fig. 28) et ceux liés au contexte (fig. 29). Il est important de rappeler que la diversité d'approches et de pensées architecturales est infinie et donc que les ensembles de critères présentés regroupent les plus fréquents, mais ne sont pas exhaustifs.

<i>Les critères liés à la nature du matériau.</i>	
- la couleur.	- la continuité de surface. ex : béton est coulé et donc continu ou de finition, ex : Guggenheim ou encore la brique est modulaire, il y a donc interruption notion de planéité de surface.
- la mise en œuvre : temps de pose...	- la flexibilité plastique.
- le poids : lourd, léger...	- le comportement dans le temps : questions de la finition, le vieillissement inspire souvent le mépris il n'est pas nouveau que les concepteurs essaient d'empêcher le temps de faire son œuvre
- la résistante au feu.	- le comportement aux intempéries.
- la résistance à la corrosion.	- ...
- la réaction, le comportement : flexibilité, fragilité, fatigue, dureté, résilience, fluage...	
- le quotient thermique.	
- la pollution : gaspillage, quantité d'énergie utilisée lors de fabrication, transport, mise en œuvre...	
- l'acoustique.	

Figure 29. Tableau des critères possibles liés à la nature du matériau.

<i>Les critères liés au contexte.</i>	
- la culture. Ex : la noblesse du matériau, l'esthétique (visuelle, tactile, légèreté apparente, brillance, ...), la localité, la tradition ex : Siennes sens du lieu que l'on va construire, sentiment d'appartenance...	- la disponibilité technologique. Savoir-faire, pose et finition...
- le budget.	- l'utilité. D'après Schinkel (Karl Friedrich) dans ses recherches achevées en 1836 à la Bauakademie : il a la conviction que l'utilité est un facteur déterminant essentiel à l'architecture.
- la disponibilité de la matière : rareté ou abondance, ex pour le choix d'une essence de bois : matériau extrait ou fabriqué localement...	- les pratiques du concepteur : habitudes, courant architectural...
	- ...

Figure 30. Tableau des critères possibles liés au contexte.

Pour illustrer le cheminement que peut effectuer l'architecte dans le choix du matériau, on peut se référer aux propos de M. Edward repris sous forme de tableau (fig. 30). Exposant les conséquences et les influences dans ce choix, elle présente ce cheminement comme une démarche à deux choix successifs : un premier est lié aux considérations architecturales, c'est-à-dire à la procédure de détermination des critères majoritaires pour le concepteur (cf. tableaux précédents), il consiste à se positionner dans une grande typologie ou famille de matériaux et le second choix est plus en collaboration avec l'ingénieur qui appuie et conseille l'architecte pour l'affinage.

« Une fois **la grande typologie de matériau choisi** (bois, acier, béton...), nous conseillons l'architecte à chaque étape pour le bon choix pour l'**affinage**. Par exemple, une fois le choix effectué sur le béton, il reste à déterminer quel type de béton, quelle résistance : classique, moins cher, ou plus résistant, ce qui nécessite savoir faire et coût, la couleur, blanc ou gris, type de coffrage, HQE tous ses choix s'effectuent par rapport au jugement de l'architecte que l'on conseille. »¹²

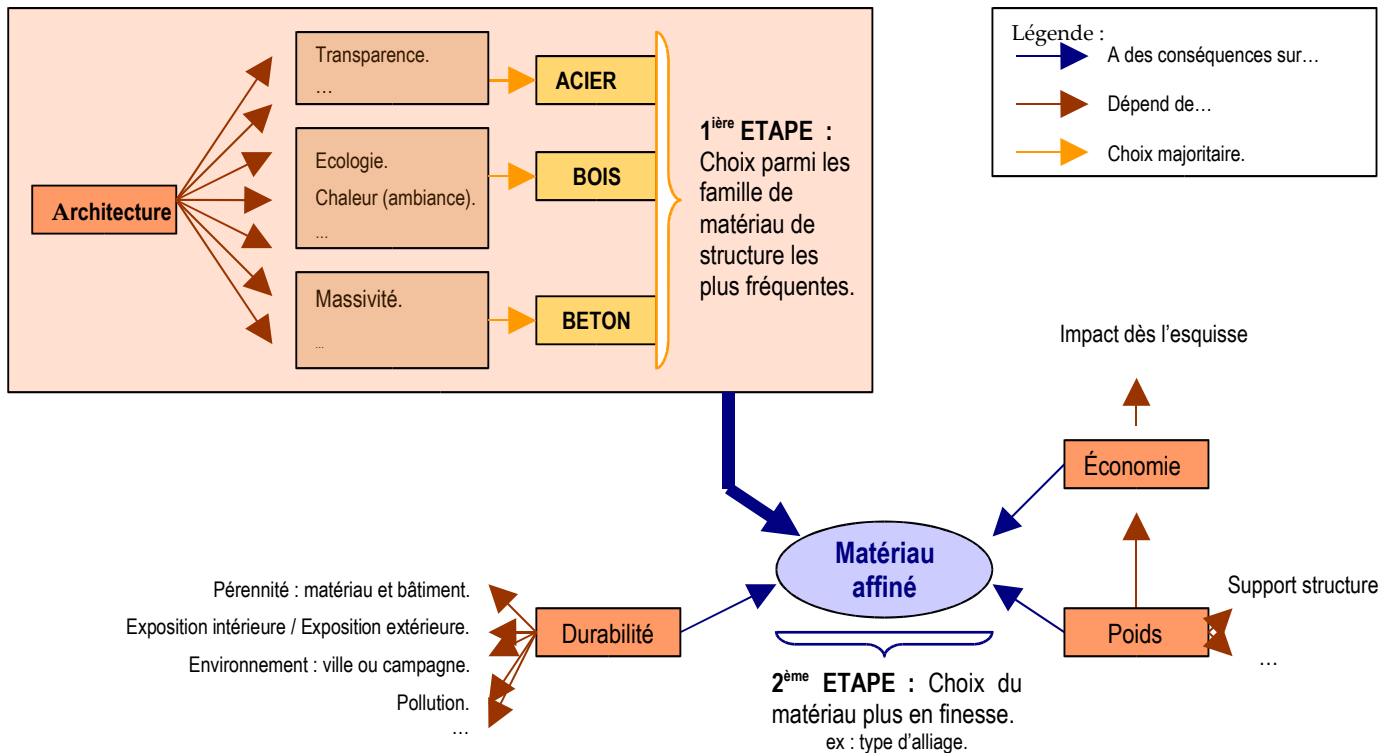


Figure 31. Choix du matériau : conséquences et influences d'après Edwards (cf. annexes).

L'intervention du matériau reste assez flexible vis-à-vis du processus d'intervention, il peut être un postulat comme être le résultat attendu. Cependant, les entretiens ont conforté l'idée que le matériau reste une intuition des architectes qui demande à être discutée avec les ingénieurs.

4.2.3 La portée.

La portée représente une contrainte architecturale, c'est-à-dire une préoccupation sur l'espace, présente dès le stade esquisse. Elle est directement issue d'une évaluation effectuée par l'architecte sur le volume utile. Le volume utile correspond à l'ensemble du volume que doit couvrir la structure.

« On part du **volume utile** (fig. 32) : en dessus de la structure, puis on construit **l'enveloppe**. Le volume utile est un critère omniprésent (dans la

¹²Propos issus d'un entretien avec Mitsu Edwards, ingénieur à RFR de Paris. Propos retranscrits en totalité en annexes.

détermination de la structure), lié de façon très étroite au volume habitable et donc à la fonctionnalité. »¹³

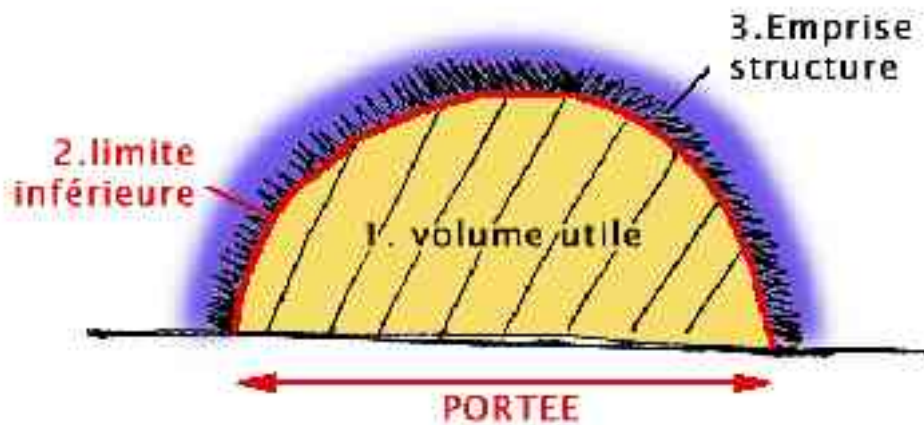


Figure 32. La portée comme contrainte architecturale : trois étapes de détermination.

L'évaluation du volume utile se traduit par la détermination de l'espacement des points d'appuis de la structure, c'est-à-dire la portée.

Cette donnée est une donnée déterminée par l'architecte, cette préoccupation architecturale fait à part entière partie du discours architectural et donc de l'énoncé du problème. Aux vues des entretiens, il reste extrêmement rare que la portée soit une des attentes dans le problème.

4.2.4 Les charges.

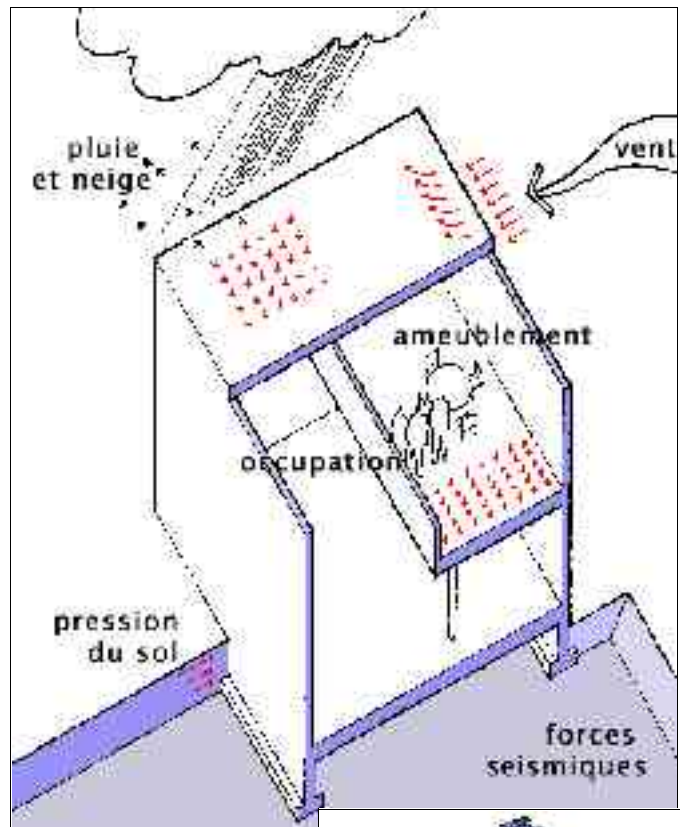
A l'image de la portée, les charges représentent une donnée présente dès l'esquisse. Les charges appliquées à une structure sont très variées. Elles représentent des contraintes d'ordre technique.

¹³ Propos issus d'un entretien avec François Lausecker, architecte à Gérardmer. Propos retranscrits en totalité en annexes.

Les charges qui s'appliquent aux structures proviennent de différents registres (fig.33):

- Les **charges permanentes**: poids des constituants d'un édifice.
- Les **surcharges d'exploitation**: les occupations, le mobilier...
- Les **charges statiques**, dues à des forces constantes: pression du sol...
- Les **charges dynamiques**, dues aux forces instantanées variables: pluie, neige, vent, séismique ...

Figure 33. Exemples de charges appliquées à un bâtiment. [CHI1975]



Le calcul des charges appliquées est basé sur des catalogues ou cartes. Par exemple, la détermination des forces du vent à appliquer ou encore le poids de la neige est faites à l'aide d'une carte de vent ou neige (fig.33) basées sur une moyenne de relevés effectués et reconnus par les réglementations.



Figure 34. Carte des vents de 1998.
La France est réglementée en quatre zones de vent.

Les charges sont le plus souvent considérées comme des charges uniformément réparties: c'est-à-dire les charges permanentes, d'exploitations et statiques. Ces charges sont étroitement liées à la portée et sont donc issues de barèmes réglementés. Les charges dynamiques, comme celles du vent, sont des charges appliquées ponctuellement. Leur détermination fait appel au savoir-faire et à l'intuition de l'ingénieur et leur prise en compte peut n'apparaître qu'aux étapes plus avancées du projet pour affinage de la structure.

4.2.5 Quelques scénarios.

Ainsi, au travers d'écrits et d'entretiens, nous avons fait émerger plusieurs données: la typologie structurelle formelle, la typologie structurelle mécanique, la portée, le matériau ou encore les charges.

La question de la structure se place dans l'optique de la réduction des incertitudes. Selon les écrits comme ceux de Tabouret [TAB1985] ou encore au travers des entretiens, ce problème apparaît dès l'esquisse et s'affine tout le long du processus de conception.

La diversité d'approches du projet renvoie à une diversité de formulation de problèmes.

Cependant, pour formaliser un problème il est essentiel de bien situer sa formalisation en fonction de son étape d'apparition et de ses données de départ, l'énoncé, et celles de sortie, les solutions possibles.

Les scénarios, présentés ci-dessous, ne sont pas exhaustifs mais représentent des cas couramment rencontrés et donc la formulation est issue des analyses, sur chaque donnée, présentées précédemment.

La place de ces scénarios dans le processus de conception est celle d'une première formulation amenant intentions et solutions qui, regroupées, aboutissent à l'énoncé d'un nouveau problème dans l'optique d'une réduction d'incertitudes (fig. 36).

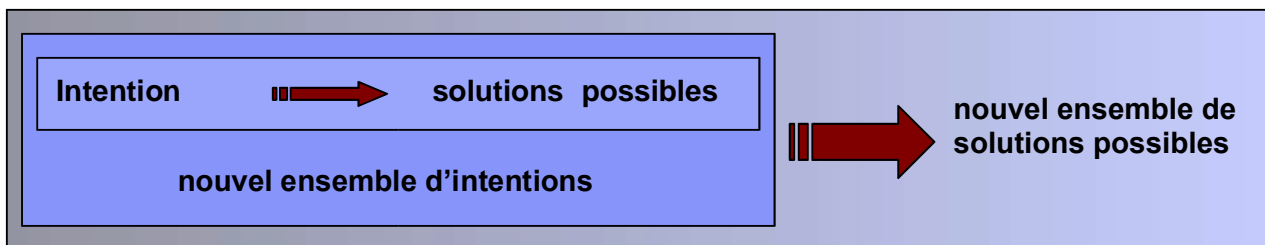


Figure 35. Schéma de réduction des incertitudes par enrichissement d'énoncé.

Ainsi, nous pouvons construire des scénarios de problèmes de détermination de structure de type esquisse (fig. 37).

Données de départ : intention(s)	Résultats possibles : solution(s)
<ul style="list-style-type: none"> - Typologie structurelle mécanique. - Charges uniformément réparties. - Portée. 	<ul style="list-style-type: none"> - Typologie structurelle formelle (hauteur, forme...) - Matériau.
<ul style="list-style-type: none"> - Typologie structurelle formelle (forme, hauteur maximum...). - Matériau. - Charges ponctuelles et réparties. 	<ul style="list-style-type: none"> - Typologie structurelle mécanique
<ul style="list-style-type: none"> - Matériau. - Charges uniformément répartie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Typologie structurelle formelle. - Typologie structurelle mécanique. - Portée
...	...

Figure 36. Scénarios possibles de problèmes de détermination de structure de type esquisse.

Ces scénarios serviront d'exemple pour une proposition de prototype à l'usage des architectes pour la détermination de structure au stade esquisse.

5 PROPOSITION D'UN PROTOTYPE.

A la suite des différentes analyses, état de l'art et entretiens, nous avons pu faire émerger des pistes pour répondre à notre problématique concernant la structure dans le projet architectural. Ces pistes seront développées au travers d'un prototype d'outil, basé sur la modélisation inverse et destiné aux architectes, qui se veut d'avantage être une approche expérimentale qu'un outil opérationnel.

Au delà des seuls problèmes de structure, le développement d'un tel outil de modélisation inverse devrait permettre d'évaluer la pertinence d'une telle approche. Cette pertinence s'évalue sur deux niveaux : d'une part, dans le fonctionnement, (ex : choix de la modélisation) et l'utilisation dans le processus de conception, c'est-à-dire quand c'est utile et quand ça ne l'est plus, d'autre part dans les critères: contraintes architecturales et contraintes constructives.

Dans la présentation du prototype, nous justifierons le choix de la modélisation de détermination de structure, que nous argumenterons du point de vue architectural comme technique, ainsi que dans sa volonté d'être efficace au stade esquisse. Puis nous présenterons le prototype à travers un exemple choisi parmi les scénarios de problème déjà proposés.

5.1 La modélisation retenue : la statique graphique.

Dans cette partie, nous expliquerons le choix porté sur la modélisation par statique graphique comme générateur de solutions.

5.1.1 L'intérêt d'un support graphique pour les architectes.

La conception architecturale et la culture des architectes sont imprégnées par une **forte autorité du dessin et de l'expression graphique en général**. Le dessin n'est pas seulement le support d'expression mais il est aussi un outil de simulation graphique [LEB1983]. C'est par la médiation du dessin que sont créés et précisés les formes du projet réalisant les intentions du concepteur. De ce point de vue, il semble donc que l'exploration d'un univers de formes, lorsque ces formes présentent une richesse plastique infinie, est mieux réalisée par une approche graphique que par toute autre approche dans le cadre du projet.

Ainsi le **support de génération de solutions** qui sera implanté dans notre prototype qui pourra être lui-même assimilé à un modèleur déclaratif sera : **la statique graphique**. Elle représente l'une des rares, voir la seule, modélisation offrant des solutions entièrement par recours au dessin, contrairement à la méthode des éléments finis couramment utilisée dans les outils qui a recours presque exclusivement à des calculs algébriques et qui requiert un état très abouti du projet.

5.1.2 Apport de la statique graphique.

Pour se positionner vis-à-vis de notre problématique et de l'utilisateur visé, il est important de bien connaître les avantages comme les inconvénients d'un tel support graphique.

Les avantages d'une approche par statique graphique.

Etant une modélisation entièrement basée sur le dessin, cette modélisation s'applique assez bien à l'environnement des architectes qui peuvent très efficacement juger de la pertinence des formes proposées. En effet, la conception architecturale offre une grande richesse plastique. Parmi toutes ces formes qui appartiennent au **processus d'exploration graphique**, certaines peuvent éveiller l'attention du concepteur, en d'autres termes la présentation graphique des formes est susceptible **d'inspirer au concepteur une solution satisfaisante** au problème qu'il pose.

Employant cette modélisation comme générateur de solutions, ces avantages vont au-delà du simple outil de calcul présenté dans l'état de l'art, mais sont ceux d'un outil dynamique de dessin guidé par un code conservant le cadre du réalisable. En effet si la statique graphique représente un outil de calcul et de vérification, ses attributs permettent une certaine dynamique concernant la forme funiculaire. Cette forme funiculaire traduit la courbe de compression pure qui doit être contenue dans la structure et donc offre par manipulation du pôle (cf. fig. 20) une variation infinie de cette courbe et une prise de connaissance directe de la forme par l'utilisateur.

Ainsi, cette modélisation permet à la fois la **génération dynamique de solution(s) et leur(s) prise (s) de connaissance**.

Le résultat se présente sous **forme brute**. Cette forme brute apporte diverses informations : la **typologie structurelle formelle**, la **typologie mécanique**, les **points d'appuis**, la **portée ou encore le moment fléchissant** (zone en bleu sur la fig. 38).

Cette **prise de connaissance par solution plus ou moins primitive** représente un catalyseur de créativité qui permet de multiples possibilités d'interprétations, porteuses d'un « potentiel plastique ». Cette méthode est donc **d'une grande flexibilité s'adaptant aux premiers pas dans la conception**, lorsque le projet est encore un ensemble d'intentions informes (au sens propre) engendrant une multitude d'interprétations. (fig. 38 et 39).

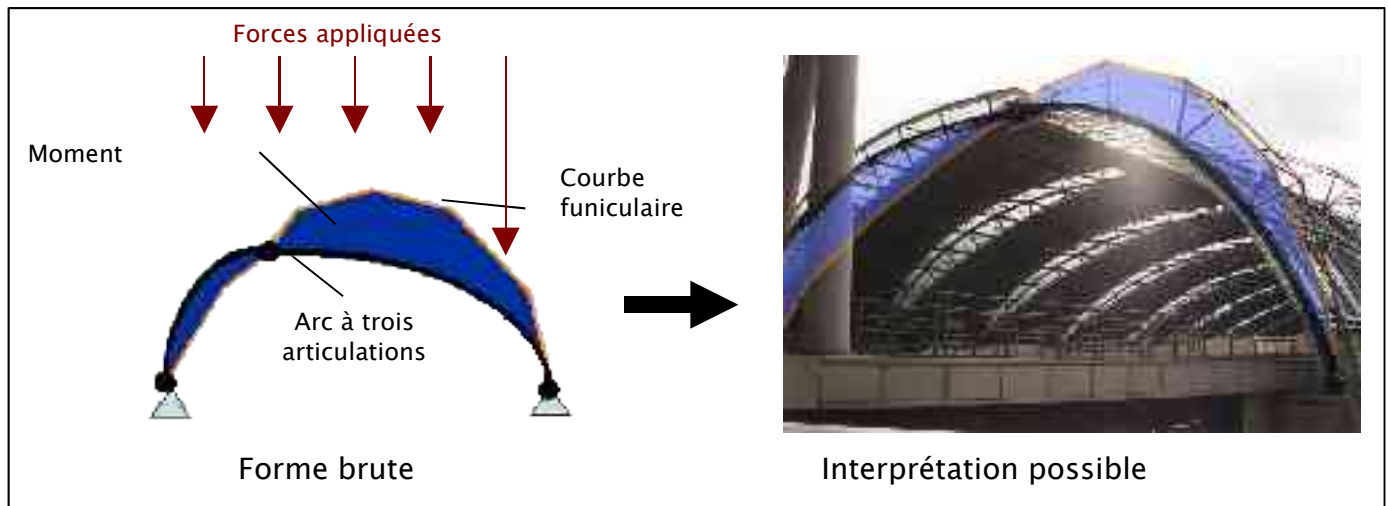


Figure 37. Exemple d'interprétation d'une solution brute : Terminal de la gare de Waterloo, London, Architectes : Nicholas Grimshaw et associé, 1993.

Figure 38. Un exemple « bois » d'interprétation d'une forme brute. Centre nautique de Sète, architectes : Carduner et associés, 1995. (source image support : [SB5-1995])

Les limites d'une approche par statique graphique.

Cependant, si cette technique a de nombreux avantages répondant aux conditions de réponse à notre problématique, elle possède néanmoins deux limites principales. D'une part, offrant une solution brute, cette méthode propose **rarement un objet constructible** dans le contexte du projet. Les formes présentées sont assimilables à des ébauches et nécessitent une interprétation architecturale dans le projet finalisé. En d'autres termes, le concepteur doit rendre crédible ces formes brutes. De ce point de vue, elle n'apporte pas de solutions réalistes. D'autre part, cette méthode fonctionnant **en deux dimensions**, elle n'offre pas la possibilité de conception de structure tridimensionnelle (fig. 40).

Figure 39. Exemple de structure tridimensionnelle: un comptoir forestier à Manche en Famenne, Belgique, architectes: Samun et associés, 1996. (Source: [SB10-1996])

Cependant, les structures tridimensionnelles restent encore très minoritaires par rapport à celles de type 2D, c'est-à-dire calculable en deux dimensions et répétitive par translation ou rotation dans la troisième dimension. (fig. 41).

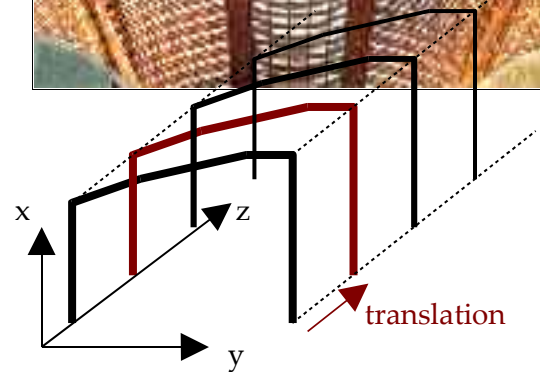


Figure 40. Exemple de structure répétitive: salle d'exposition d'un magasin à Hergatz, Allemagne, architecte: Baumchlager et Eberle, 1999. (source: [SB26-1999]), photographie accompagnée d'un schéma de répétitivité par translation.

Au-delà de ces inconvénients, cette méthode offre une grande richesse par manipulation graphique d'une part, et par la crédibilité des solutions d'autre part. Elle offre simultanément deux plateaux : - un aspect dynamique et graphique nécessaire au développement du projet par l'architecte qui concilie pertinence et plastique des formes qu'il conçoit (usage, économie...).
- un aspect mécanique explicite aux ingénieurs.

5.2 Notre modeleur déclaratif.

Au travers des différentes analyses présentées précédemment, nous avons réunis les éléments nécessaires pour présenter l'outil d'assistance à la conception de structure. En effet, nous avons établi la nécessité de développer un outil sur les structures apportant des solutions dès le stade esquisse, avec comme piste la démarche inverse. Les entretiens ont soulevé l'apparition du problème dès le stade esquisse, ainsi qu'évoqué les données du problème, énoncé comme solutions, possibles à cette étape. Ainsi, le prototype proposé met en œuvre une méthode de simulation inverse de détermination de structure dans le cadre du projet architectural s'appuyant sur un support graphique dynamique.

5.2.1 Le support de programmation : Cabri.

Le choix du support de programmation doit être guidé par les conditions que doivent valider le modeleur déclaratif : être graphique et dynamique. Pour cet effet, notre choix s'est arrêté sur Cabri Géomètre II plus. Il permet une programmation par éléments géométriques, ce qui s'accorde avec le protocole de construction de la statique graphique.

Figure 41. Capture d'écran de la fenêtre d'accueil de Cabri.



Plus qu'un simple logiciel de dessin basé sur des programmations fixes, Cabri permet la manipulation d'éléments programmés comme « mobiles ».

Dans le cadre de notre problématique, ce support semble à priori être satisfaisant pour tester notre proposition et répond aux mêmes restrictions de dimension de la statique graphique, c'est-à-dire reste restreint à un espace à deux dimensions.

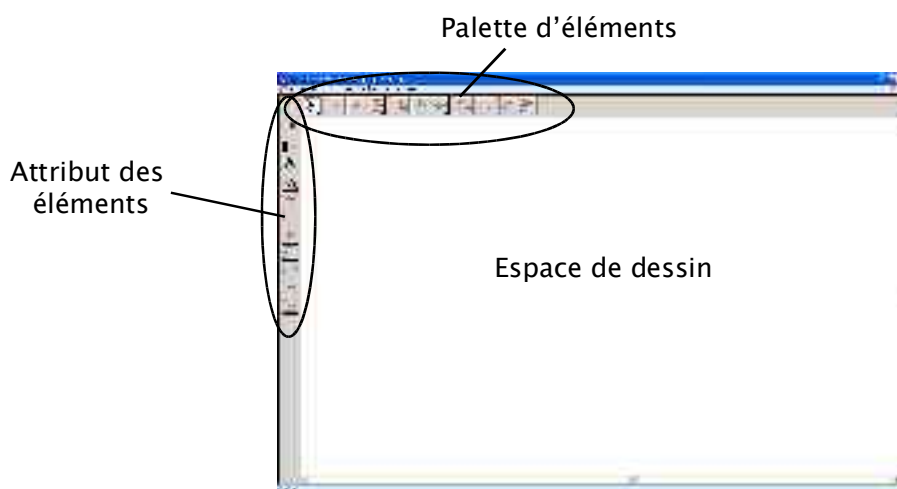


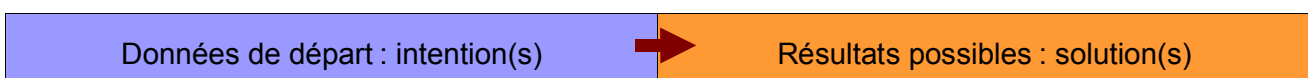
Figure 42. Espace de programmation de Cabri.

Les outils de programmation restent assez simples (fig. 43): droite, demi-droite, point, nombre, formule, cercle, polygones, vecteurs... Ces éléments représentent les principaux préceptes de la statique graphique. Ainsi, Cabri permet une liaison assez directe avec la pratique de la statique graphique, ce qui facilite la mise en place de notre prototype.

5.2.2 Le scénario du problème illustré.

Afin de présenter notre prototype qui se veut être un modèleur déclaratif, nous nous appuyerons sur un exemple de scénario (cf. fig. 37). Nous exprimerons ce problème plus particulièrement vis-à-vis du choix de la modélisation : la statique graphique. Dans un second temps, nous décrirons notre prototype au travers des différentes phases d'un modèleur déclaratif.

Lors de l'analyse des données du problème de structure au stade esquisse, nous avons soulevé la vaste diversité d'énoncés et de résultats possibles. Afin d'illustrer notre proposition, nous choisissons le scénario de problème suivant :



- Typologie structurelle mécanique.	- Typologie structurelle formelle (hauteur, forme...)
- Charges uniformément répartie	- Portée.

Figure 43. Scénario choisi pour la démonstration du prototype..

Notre démonstration se fera donc dans le cas d'un problème de structure dans lequel l'architecte a au préalable une idée de la typologie structurelle mécanique, dans notre cas : un arc à trois articulations. La méthode de la statique graphique permet d'appliquer des charges qu'elles soient uniformément réparties et/ou ponctuelles. Dans notre cas, les charges appliquées sont uniformément réparties sur l'ensemble de la structure. Dans cette disposition, seule la nature des charges a un impact sur la forme de la structure. L'intensité intervient sur les forces intérieures : plus elle est élevée, plus la structure est sous contraintes.

Dans notre problème, l'architecte recherche une forme et sa portée. Il est essentiel de rappeler deux aspects :

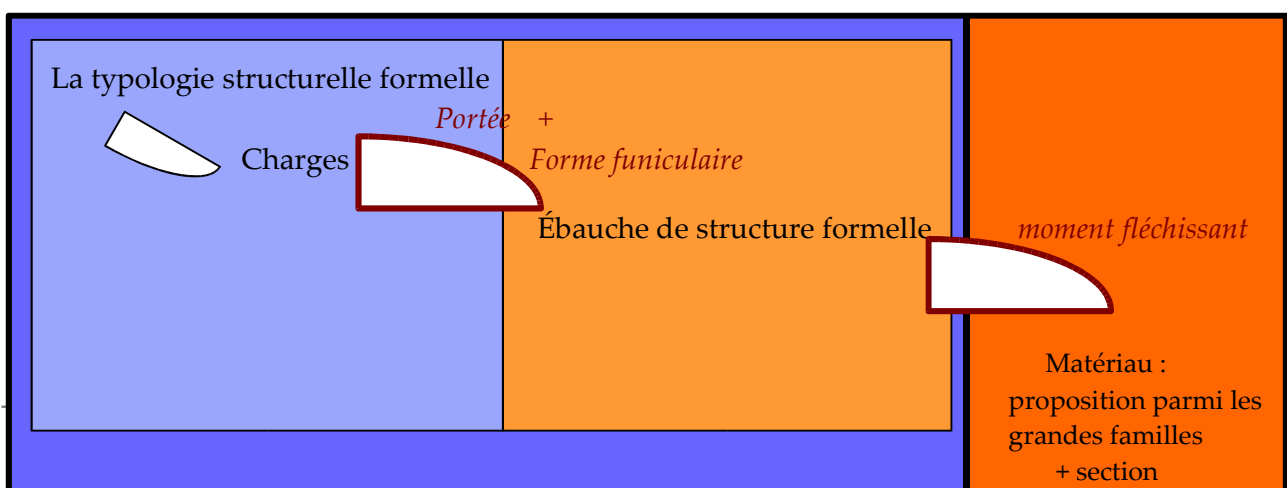
- D'une part, ce problème n'est qu'un scénario parmi d'autre. L'outil ne sera opérationnel que quand il répondra à la grande majorité de scénarios possibles et qu'il aura été soumis à validation.

- D'autre part, la solution satisfaisante au problème ne représente qu'une solution intermédiaire qui, additionnée à l'énoncé, deviendra un nouvel énoncé d'un nouveau problème. Cette récurrence sera appliquée pour l'affinage du projet, dans l'optique du projet comme réduction d'incertitudes. Par exemple de notre scénario, le nouveau problème pourrait être la recherche de matériau (fig. 45).

Données de départ : intention(s)	Résultats possibles : solution(s)
<ul style="list-style-type: none"> - Typologie structurelle mécanique. - Charges uniformément répartie - Typologie structurelle formelle (hauteur, forme...) - Portée. <div style="text-align: right; margin-top: 10px;"> <i>Solutions du problème précédent</i> </div>	<ul style="list-style-type: none"> - Matériau

Figure 44. Exemple de nouveau scénario issu d'une mise en commun de l'énoncé et de la solution satisfaisante d'un problème précédent comme nouvelles intentions.

Dans ce scénario, on peut déterminer, par intégration des données apportées par la modélisation choisie, la statique graphique, un scénario par étape de la résolution de notre problème. (fig. 46)



Intentions/énoncé

solutions intermédiaires

Figure 45. Les données (intentions, solutions et éléments de la statique graphique) et leurs apports (nouvelles données) sur le problème proposé et sa suite possible.

5.2.3 Description du modeler déclaratif.

Afin de décrire le modeler déclaratif, nous nous appuyerons sur non étendu du problème et nous traiterons un exemple sur le bois pour l'intégration du matériau comme solution au nouveau problème. Pour expliquer le fonctionnement de notre prototype nous allons le décrire selon les trois phases d'un modeler déclaratif : le langage de description, la génération de solution et la prise de connaissance.

Le langage de description.


Comme précisé dans l'état de l'art, le langage de description doit permettre de représenter n'importe quel problème dans une classe considérée.

Dans notre modeler déclaratif, le langage est à la fois dans une classe fermée et à la fois infinie.

En effet, d'une part le modeler ne propose que **des typologies structurelles mécaniques préétablies** et se limite à un **environnement géométrique 2D**, d'autre part il permet par recours à la manipulation dynamique des éléments, **d'instancier de façon très naturelle une intention sur une infinité de possibilité**, comme par exemple la détermination de la portée.

En d'autres termes, le choix du langage de description demande une grande pertinence d'une part par sa capacité à être dynamique et à offrir un ensemble de données fixes de départ : portée, typologie structurelle mécanique (cf. classification), d'autre part il doit permettre une lecture évidente pour les ingénieurs.

Dans notre modeler, le langage de description est directement celui de la statique graphique : un ensemble de typologies structurelles mécaniques définies et un ensemble d'éléments géométriques porteurs de sens pour l'architecte comme pour l'ingénieur (portée, hauteur, articulations...) et manipulables à l'infini selon les règles de la statique graphique.

<div data-bbox="145 1778 587 1872" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Charges uniformément réparties : $q = 10 \text{ kN/m}$ Hauteur maximale de l'édifice : $h = 10 \text{ m}$</p> </div>	<div data-bbox="901 1823 1061 1890" style="text-align: center;">  </div>
	54

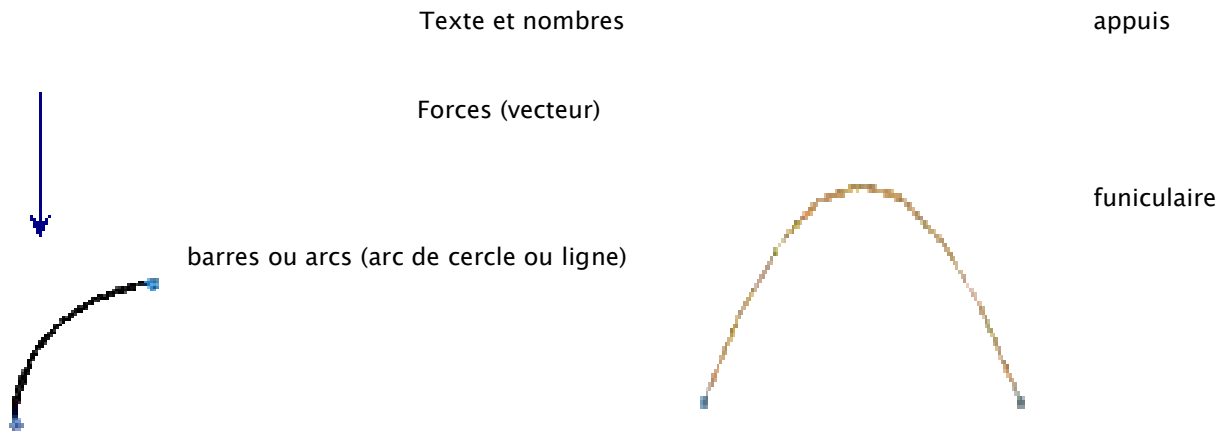


Figure 46. Exemples d'éléments du langage de description du prototype.

Le recours à une instanciation géométrique des données permet d'importer le flou. En effet, la représentation par le dessin permet une certaine liberté par rapport à toute autre méthode de description.

La génération de solution.

Le modèleur déclaratif permet de donner, en théorie, l'ensemble des solutions possibles répondant aux intentions posées. Dans notre modèleur, ce sont les préceptes de la statique graphique qui génèrent des solutions. Par programmation des principes « géométriques » de la statique graphique et par choix pertinent de dynamiser tel ou tel élément, la génération de solutions permet d'offrir sur un seul et même support manipulable l'ensemble des solutions possible aux intentions. En d'autres termes, la programmation permet une grande dynamique sur le dessin afin de répondre aux intentions.

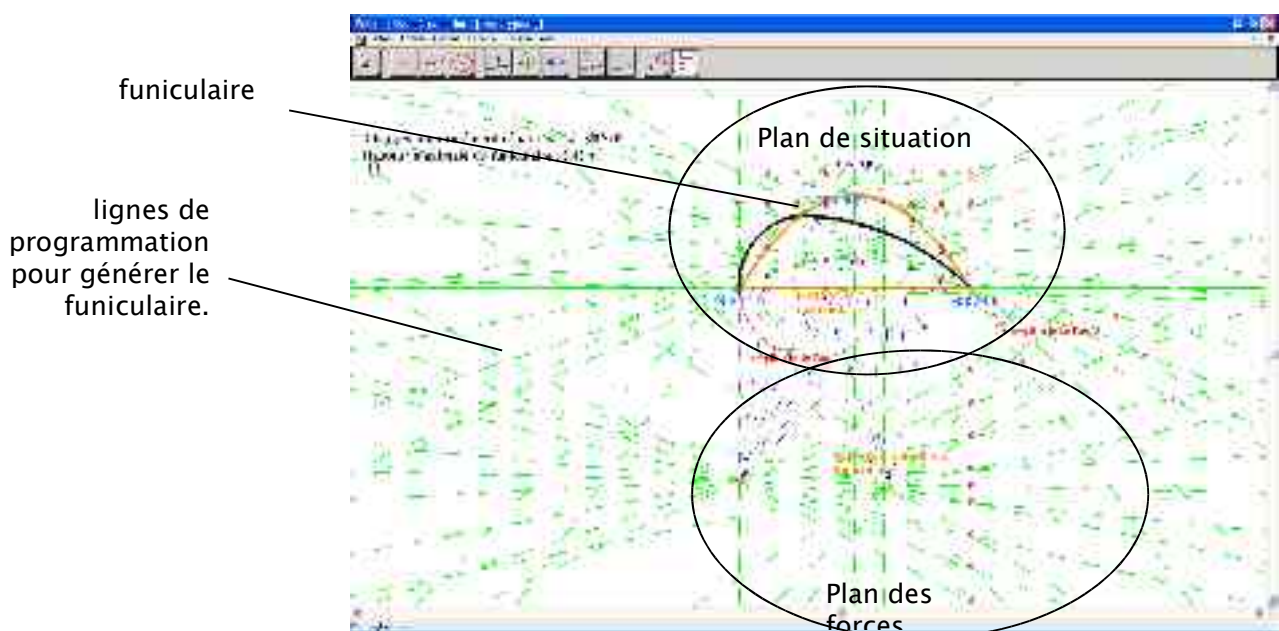


Figure 47. Capture d'écran de la zone de programmation, par géométrie, du prototype.

Cette méthode permet donc d'explorer l'ensemble de tous les objets possibles validant les intentions. Elle permet de visualiser une infinité de solutions ce que peu de modeleurs déclaratifs gèrent facilement.

La prise de connaissance.

La prise de connaissance se fait sur le même support que la première phase : le plan de situation. Suivant la nature du problème et donc la nature du résultat attendu, il peut être proposé plusieurs plans de situation offrant chacun une solution possible, comme dans le cas d'un scénario où l'on recherche la typologie structurelle mécanique où chaque solution serait proposée sur un dessin distinct.

Dans notre scénario, l'ensemble des solutions (typologie structurelle formelle et portée) est visualisable sur un seul plan. En effet, les objets manipulables sur le dessin offrant une multitude de solutions sont : l'amplitude du funiculaire, la place de l'articulation centrale de l'arc, l'amplitude des deux arcs et la portée. (fig. 49)

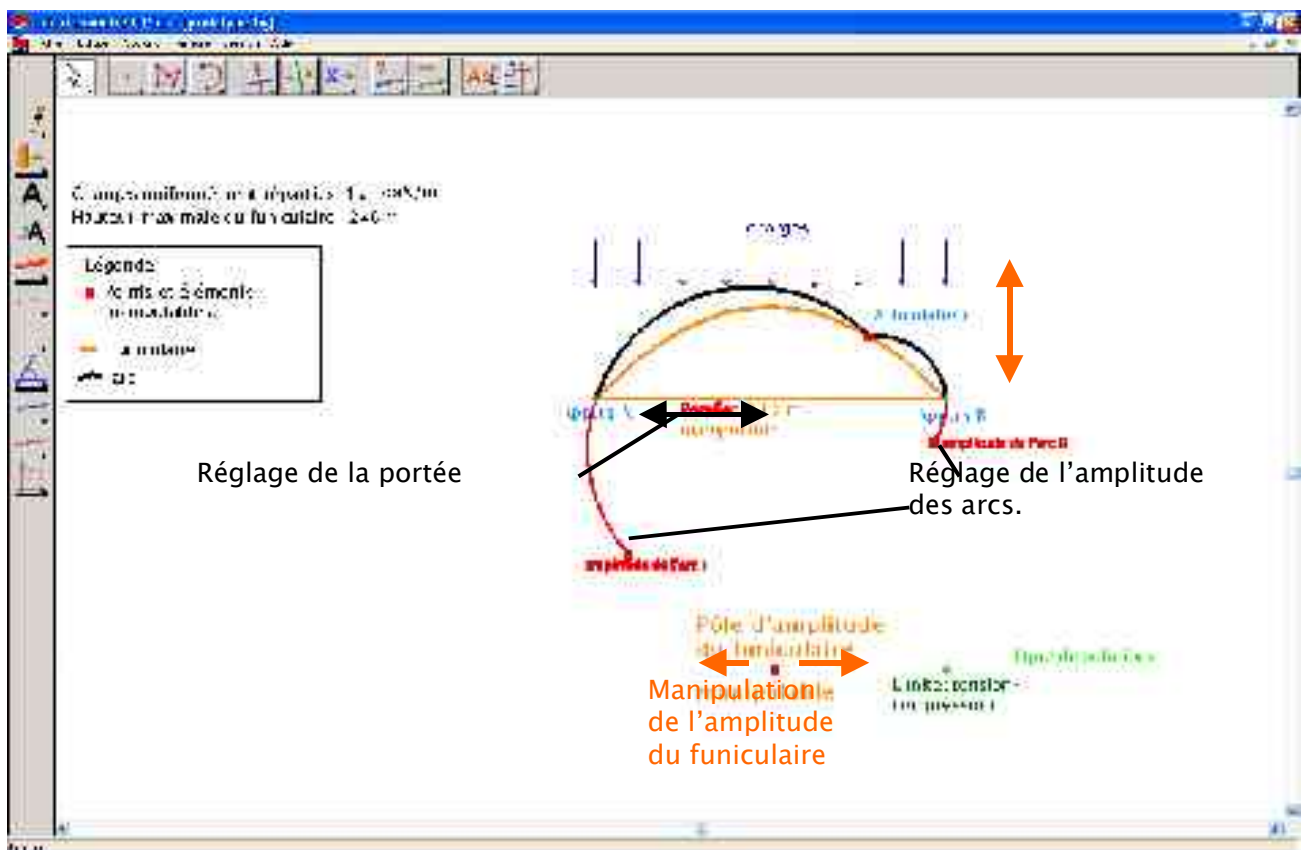


Figure 48. Les éléments manipulables du prototype.

Ainsi, l'architecte dessine sa structure dans un espace 2D tout en restant dans un univers de solutions validant les intentions (fig. 49).

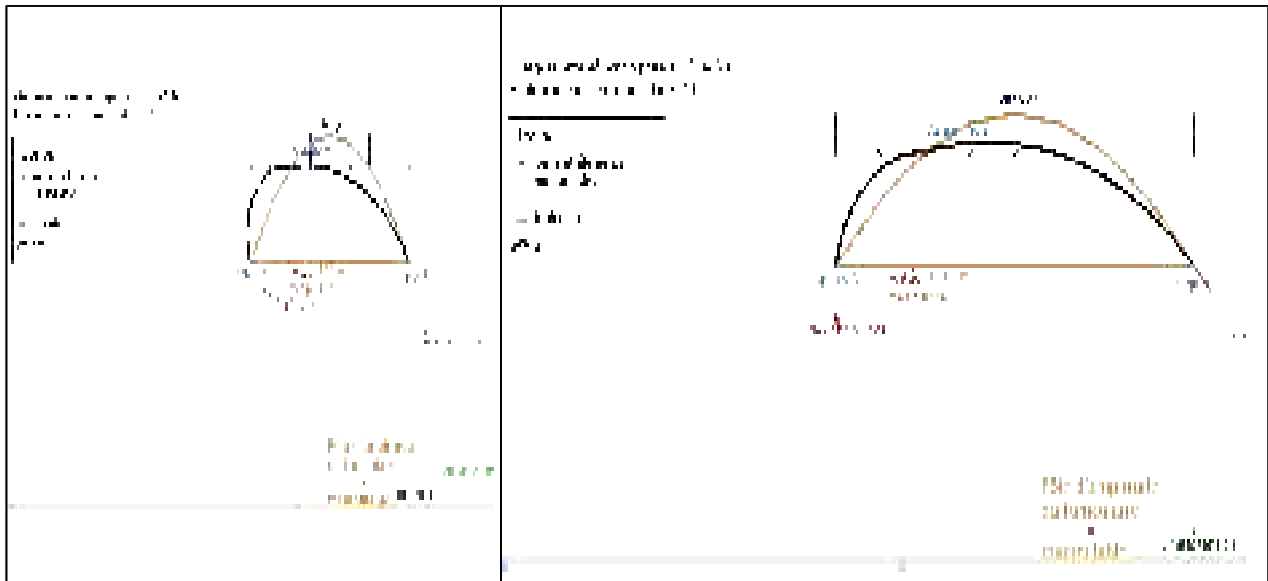


Figure 49. Exemples de résultats possibles.

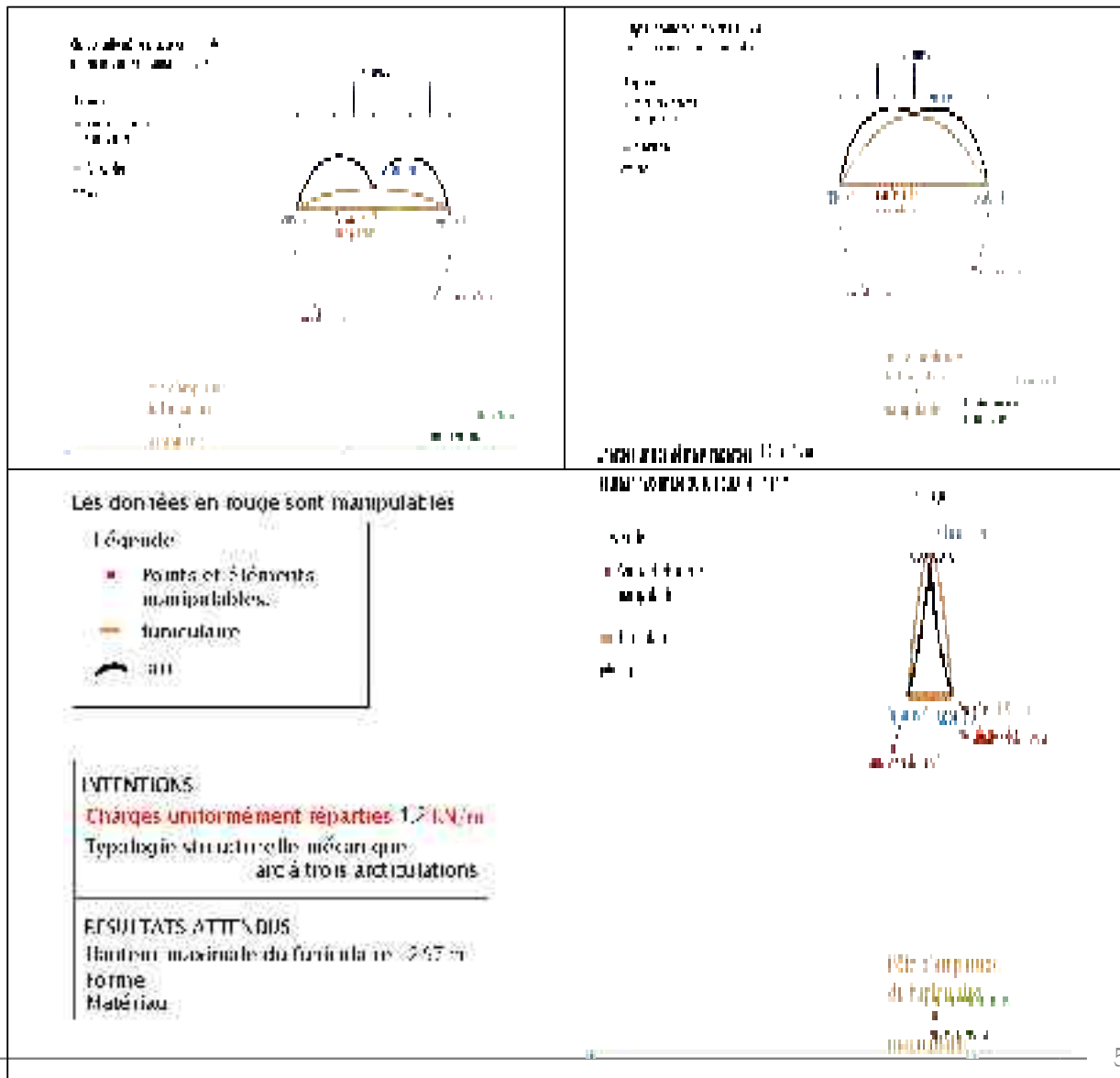


Figure 50. Exemples de résultats possibles au scénario de problème choisi.

L'intégration du matériau.

Dans le cadre de l'esquisse, le choix du matériau se fait au niveau de la première détermination, c'est-à-dire le choix parmi les grande famille de matériau : bois, acier, béton, titane... L'affinage se fait dans les étapes plus avancées du projet.

L'outil permet facilement d'obtenir le moment fléchissant maximum (M max) par mesure de la plus grande longueur possible entre le funiculaire et la structure dessinée. (fig.49)

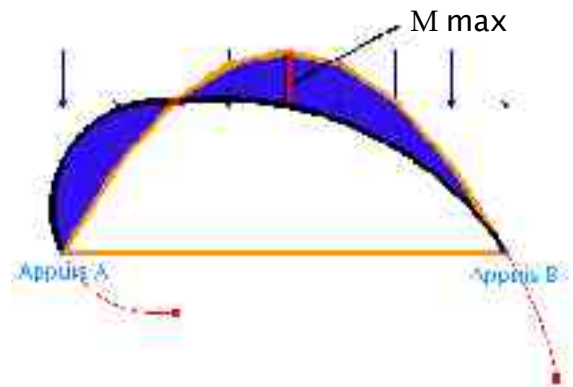


Figure 51. Le moment fléchissant maximum sur l'épure de l'outil.

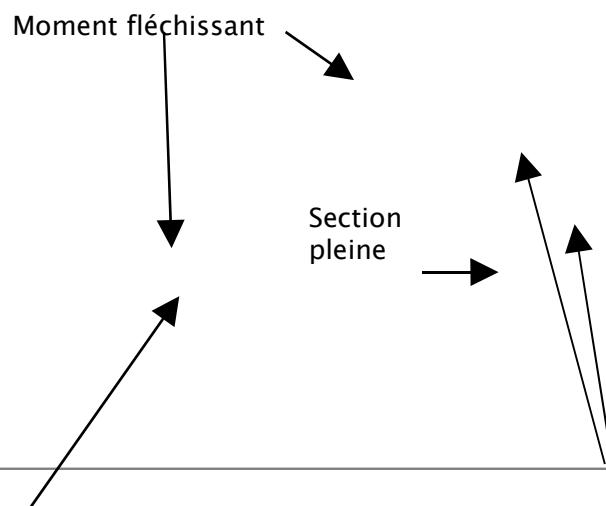
Le moment fléchissant permet d'obtenir la section de la structure en chaque point.

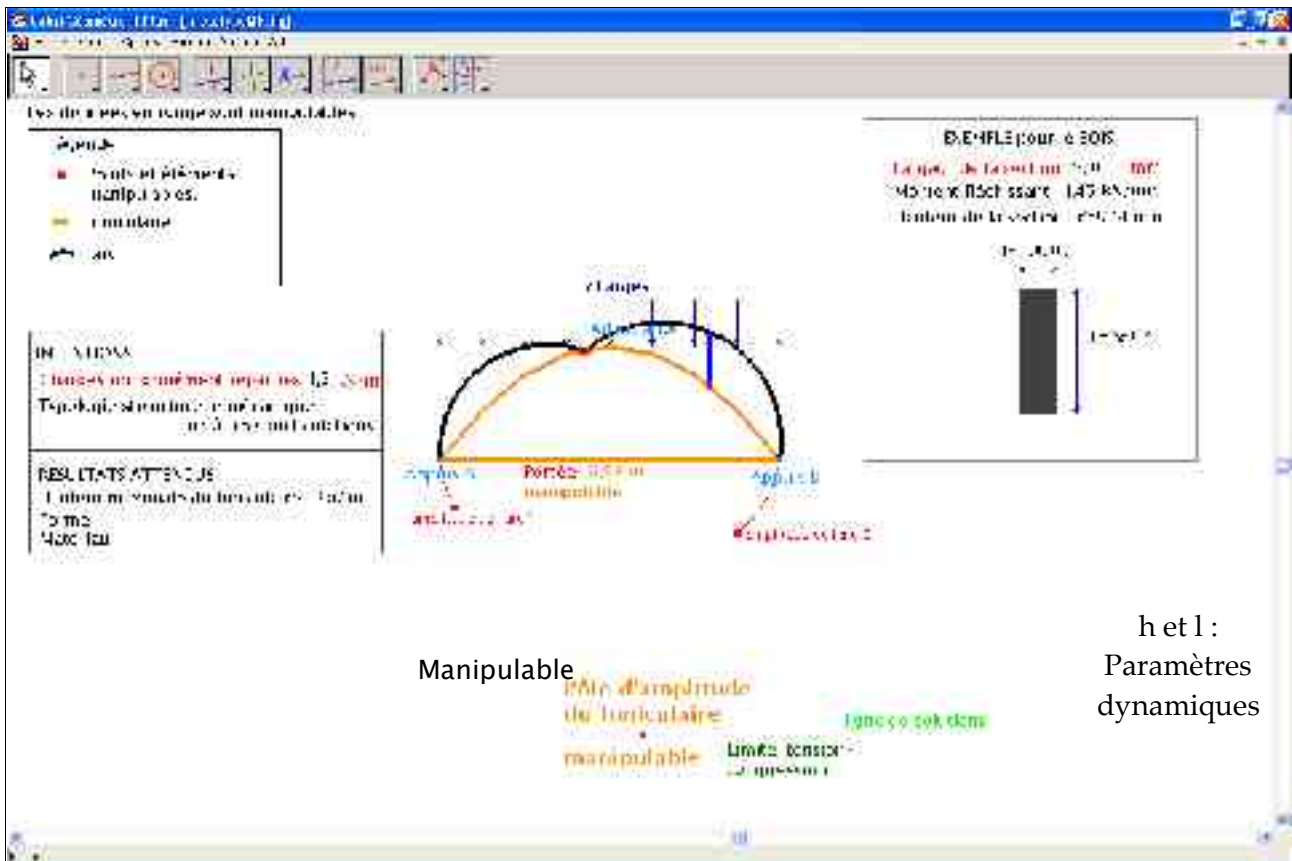
En effet, par un recours à une formule et à des caractéristiques de matériau (fig. 51), il est possible de dimensionner, pour le bois par exemple en section pleine on peut trouver la hauteur et la largeur.

Caractéristiques	BOIS	ACIER
δ max	10 MPa	235 MPa
Section	$\delta = M / (bh^2/6)$	Voir catalogue

Figure 52. Relation entre le moment fléchissant et la section.

En appliquant cette formule dans l'outil, on peut comme illustré sur le bois, obtenir une section (fig. 53)





Bilan.

Ainsi, à la suite de diverses analyses, nous avons développé un prototype d'outil d'assistance à la conception. Cet outil répond aux exigences des architectes, c'est-à-dire s'accorde avec les méthodes de travail des architectes grâce au dessin mais reste explicite pour les ingénieurs puisque basé sur une modélisation des sciences de l'ingénieur structure.

Cependant, si il offre une infinité de solutions manipulable graphiquement et assurant la validation de propriétés souhaitées, il reste applicable dans le cadre de structures 2D. En traduisant le principe de funiculaire en un ensemble d'équation de formule algébrique dans un univers 2D, il devient simple d'extrapoler cette technique en 3D.

Afin de mesurer l'intérêt d'un tel outil, il est important d'en situer l'usage dans le processus de conception. En effet, ce problème étant présent dès le stade esquisse, l'outil que nous proposons est applicable à cette première étape du projet, cependant, son emploi reste plus limité pour les étapes plus définies où l'emploi de logiciels basés sur les éléments finis et les codes de calculs serait plus judicieux.

Dans le cadre du stade esquisse où de nombreuses inconnues existent, le résultat proposé reste sur forme brute et sous le regard expert de l'architecte ouvre la voie à une représentation plus complète. Restant à affiner, elles annoncent cependant la finalité et le domaine de validité.

Ainsi, le modeleur déclaratif proposé permet de créer géométriquement des structures et de fournir des informations susceptibles d'être nécessaires à l'ingénieur. Il permet d'explorer les propriétés architecturales et constructives de l'objet représenté. Cependant, il est essentiel de

rappeler que si l'architecte est en situation d'affirmer que les solutions proposées valident les intentions, il peut ignorer les autres propriétés qu'elles impliquent.

6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

Dans la conception architecturale, de nombreux problèmes sont en attente de solution(s) dans une optique de réduction des incertitudes [TAB1975]. Pour parvenir à cette réduction d'incertitudes, les architectes ont à leur disposition plusieurs méthodes : l'une couramment employée, la démarche directe, l'autre plus rare mais plus prometteuse la démarche inverse.

Parmi les problèmes formulés sous forme d'**énoncé**, les **intentions**, et de **solutions**, les **formes**, apparaît celui de la structure. Comme relevé lors des études et des entretiens, ce problème survient très tôt dans la conception et peut être formulé de multiples manières, autour de quelques données majoritaires : la portée, la typologie structurelle mécanique, la typologie structurelle formelle, les charges et le matériau.

Ces données regroupent les contraintes qui permettent la formulation et la formalisation du problème. Nos recherches ont soulevé deux catégories de contraintes : les contraintes structurelles architecturales, de l'ordre de l'espace et de la forme, et les contraintes structurelles techniques, de l'ordre de la réalisation. La résolution de ce type de problème est l'aboutissement à une solution répondant au mieux aux intentions du concepteur. Pour aider l'architecte à concevoir sa structure, il existe aujourd'hui des logiciels qui représentent d'avantage des outils de vérification que des outils d'aide à la conception, basé sur une démarche directe. Ces outils pour la détermination de structure sont très nombreux, cependant, aucun ne peut s'assimiler à une démarche inverse.

Ainsi, au travers d'un scénario d'un problème, nous avons élaboré un outil d'aide à la conception de structure apportant des solutions dès le stade esquisse. Basée sur un environnement graphique dynamique, il semble plus approprié aux habitudes de travail des

architectes. Il offre des solutions brutes qui permettent à l'architecte d'une part beaucoup de liberté dans son interprétation, et d'autre part, de mettre à profit ses compétences graphiques.

Pour valider cet outil comme un modéleur déclaratif, c'est-à-dire comme un outil de résolution d'un problème géométrique inverse, il est essentiel de le soumettre à expérimentation.

Cependant, pour permettre cette expérimentation, l'outil devra être opérationnel. En d'autres termes, si sa forme actuelle et son support de programmation nous ont permis aisément de valider notre proposition et d'en apercevoir le grand potentiel, notre prototype reste dans un environnement trop limité (Cabri) pour pouvoir évoluer aisément. Lors de nos recherches, nous avons entrevu le potentiel des algorithmes génétiques employés pour générer des parcours. L'emploi de ces algorithmes génétiques semblerait être très prometteur pour la suite de cette étude. Cependant, il serait intéressant de comparer les différentes performances des méthodes d'intelligence artificielle disponibles vis-à-vis de la génération de solution dans le cadre de la conception de structure. En effet, il existe trois méthodes :

- les **algorithmes génétiques** qui sont une optimisation sur des variables prédéfinies.
- les **réseaux de neurone** : qui offre des solutions par études d'exemples. Ils analysent la situation et recherchent des solutions par apprentissage au travers d'exemples.
- la **logique floue**.

Ces méthodes peuvent être combinée afin de perfectionner l'outil.

Ainsi, à la suite de différentes études, il nous a été possible de proposer une réponse à notre problématique sous la forme d'un prototype de principe à l'usage des architectes pour les assister dans la conception de structure. Il est important de relever que cet outil est applicable, voir efficace, au stade esquisse mais nécessite la collaboration d'outils basés sur les éléments finis dans des étapes plus avancées du projet, afin de constituer un ensemble d'outil performant et omniprésent dans l'ensemble du processus de conception architectural autour du problème de structure.

7 BIBLIOGRAPHIE.

Ouvrages.

- [CHI1975] CHING (Francis.D.-K).- Building construction illustrated.- New-York, édition : Van Nostrand Reinhold, 1996.
- [CON1990] CONAN (Michel).- Concevoir un projet d'architecture.- Paris : Editions L'Harmattan, 1990.- 185p.
- [DEL1971] DELATTRE (P).- Système, structure, fonction, évolution, essai épistémologique.- Paris : Editions Maloine et Doin, 1971.
- [DEL1976] DELATTRE (P).- Séminaire Interdisciplinaire du Collège de France, Structure et dynamique des systèmes.- Paris : Editions Maloine et Doin, 1976.
- [KEP1967] KEPES (Gyory, sous la direction de).- Structure dans les arts et dans les sciences.- Bruxelles : Edition de la Connaissance, 1967.- 190p.
- [LEB1983] LEBAHAR (Jean-Charles).- Le dessin d'architecte : simulation graphique et réduction d'incertitude.- Roquevaire : Editions parenthèse, 1983.- 134p.
- [NOU2002] NOUVEL (Pascal, sous la direction).- Enquête sur le concept de modèle.- Partie II, *La modélisation et les sciences de l'ingénieur*, article de Bouleau Nicolas.- Paris, PUF, 2002.
- [PAU2001] PAULIN (Michel).- Vocabulaire illustré de la construction.- Paris : Editions du Moniteur, 2001.- Collection : guide technique.- 260p.
- [PER1983] PÉREZ-GÓMEZ (Alberto).- Architecture and the crisis of modern sciences.- Cambridge : Editions MIT Presse, 1983.- Pages 197 à 201.
- [PIR1967] PIRARD (A).- La statique graphique.- Paris : Editions Dunod, 1967.- 415p.

- [PUG1841] PUGIN (Robert).- The true principles of pointed or Christian architecture, 1841.
- [PRO1992] PROST (Robert).- Conception architecturale : une investigation méthodologique.- Paris : Editions L'Harmattan, 1992.- 190p.- Collection : Ville et entreprise.
- [SAL1976] SALVADORI (Mario).- Structure et architecture.- Paris : Edition Eyrolles, 1976.- 270p.
- [MOO1999] MOORE (Fuller).- Understanding structures.- Etats-Unis : Editions Mac Graw-Hill, 1999.- 286p.
- [TAB1975] TABOURET (René).- Figuration graphique en Architecture.- Paris : Atelier de Recherche et d'Etude d'Aménagement, Fascicule 1, 1975.- 123p.
- [TAB1985] TABOURET (René).- La question de la formation technique des architectes aujourd'hui : la conception technique, la pense technique.- Nancy : Ecole d'architecture de Nancy, 1985.- 114p.
- [VIO1978] VIOLLET-LE-DUC (Eugène).- Dictionnaire raisonné de l'Architecture Française.- Saint Julien : Editions de Sancey, 1978.
- [VIT1684] VITRUVÉ.- De Architectura libri decem (Traité sur l'architecture).- 27-23 avant JC.- Traduction des textes latins par Claude Perrault, 1684.
- [VIT1979] VITRUVÉ.- De Architectura libri decem (Traité sur l'architecture).- 27-23 avant JC.- Traduction intégrale du texte de Perrault revue et corrigée sur les textes latins par André Dalmas, 1979.
- [WES2003] WESTON (Richard).- Formes et Matériaux dans l'architecture.- Paris : Editions du Seuil, 2003.- 223p.

Publications scientifiques.

- [HOU2003] HOUPERT (Sylvain).- Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain.- Nantes : Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, 2003.- 350p.
- [MOT1992] MOTRO (R.).- "Essai sur la morphologie structurale".- Structural Morphology.- Actes du premier séminaire international sur la morphologie structurale, septembre 1992.
- [MOU1998A] MOUNIER (Jean-Philippe).- Le projet Urba-formes : modélisation déclarative de parcours pour la prise de connaissances d'un environnement architectural et urbain.- Université de Nantes.- Isitem, Nantes, 1998.- 315p.
- [MOU1998B] MOUNIER (Jean-Philippe).- "Modélisation déclarative : le parcours automatique comme outil d'analyse des ambiances".- Les cahiers de la recherche architecturale, n°42-43, 1998.- p 63-76.
- [NIV1999] NIVET (M-L).- De visu : un logiciel pour la prise en compte de l'accessibilité visuelle dans le projet architectural, urbain ou paysager.- Université de Nantes.- Isitem, Nantes, 1999.- 216p.
- [SIR1997] SIRET (Daniel).- Proposition pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural, application à l'ensoleillement.- Nantes : Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, 1997.- 323p.

Articles dans une revue.

[T&A1946] TECHNIQUE ET ARCHITECTURE- dossier « structures ».- N°9-10, 1946.

[SB5-1995] SÉQUENCE BOIS – Les bâtiments sportifs. – N°5, Juin 1995.- p 4 -5.

[SB10-1996] SÉQUENCE BOIS – Les constructions exceptionnelles. – N°10, Mai 1996.- p 14 -15.

[SB26-1999] SÉQUENCE BOIS – Les bâtiments d'activités. – N°26, Avril 1999.- p 16 -17.

Cours ou conférences.

[BAV2004] BAVEREL (Olivier).- Concevoir une structure, les modèles.- Nancy : conférence pour le DEA « modélisation et simulation des espaces bâtis », 2004.

[BOU2004] BOUILLARD (Philippe).- La mécanique des structure et résistance des matériaux.- Cours à l'université libre de Bruxelles.- 2004.

[PER2004] PERRONNET (A.).- Les éléments finis.- Cours de DEA « Analyse numérique » de Jussieu.- 2004.

[SAL2004] SALENÇON (Jean).- La mécanique des milieux continus.- édition de DECPM, 2004.

8 TABLE DES ILLUSTRATIONS.

FIGURE 1. MAQUETTE D'ÉTUDE DES VOÛTES DE LA SAGRADA FAMILIA DE ANTONIO GAUDI À BARCELONE (1892-1926) ÉLABORÉ PAR DÉTERMINATION D'AMPLITUDE FUNICULAIRE.	6
FIGURE 2. LE PROJET ARCHITECTURAL COMME OBJET ET DISCOURS.....	10
FIGURE 3. LA DÉMARCHE DIRECTE.....	13
FIGURE 4. FONCTIONNEMENT D'UN MODELEUR TRADITIONNEL [MOU1998A]..	14
FIGURE 5. LA DÉMARCHE INVERSE.....	14
FIGURE 6. LE FONCTIONNEMENT D'UN MODELEUR DÉCLARATIF. [MOU1998A]....	15
FIGURE 7. LES TROIS ZONES D'UN MODELEUR DÉCLARATIF.....	15
FIGURE 8. LES TROIS PHASES DU MODELEUR DÉCLARATIF. [MOU1998A].....	16
FIGURE 9. PRINCIPE D'UN MODELEUR GÉOMÉTRIQUE DÉCLARATIF D'APRÈS SIRET [SIR1997].....	18

FIGURE 10. LES DEUX OPÉRATEURS DES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES: LE CROISEMENT ET LA MUTATION. [MOU1998B].....	20
FIGURE 11. QUELQUES EXEMPLES D'OPÉRATEURS D'ALGORITHMES GÉNÉTIQUES APPLIQUÉ AU PARCOURS. [MOU1998B].....	20
FIGURE 12. LA MISE EN PLACE DU PROBLÈME DE L'ENSOLEILLEMENT DANS LE PROJET ARCHITECTURAL.....	21
FIGURE 13. SOLUTION MASQUE POSSIBLE POUR QUE LA BAIE SOIT À L'OMBRE UN APRÈS-MIDI D'ÉTÉ. SONT REPRÉSENTÉES LA SOLUTION BRUTE ET UNE INTERPRÉTATION DU CONCEPTEUR POSSIBLE. [HOU2003].....	21
FIGURE 14. LES QUATRE FAMILLES DE PARAMÈTRES POUR UN SYSTÈME [MOT1992].....	24
FIGURE 15. OBSERVATION DE LA DÉFORMATION D'UN SOLIDE PAR UNE OPÉRATION DE FORMAGE À FROID OU À CHAUD [SAL2004].....	26
FIGURE 16. LES CONNAISSANCES DE LA RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX SONT ISSUES DE L'EXPÉRIMENTATION.	27
FIGURE 17. EXEMPLE DE SCHÉMA STATIQUE POUR LA CONSTRUCTION D'UNE TRIBUNE [BOU2004].....	28
FIGURE 18. RÉOLUTION PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS D'UN PROBLÈME DE STATIQUE : MAILLAGE D'UNE PLAQUES PERCÉE. [BAV2004]... 	29
FIGURE 19. LES QUATRE PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA STATIQUE GRAPHIQUE D'APRÈS PIRARD [PIR1967].....	29
FIGURE 20. EXEMPLE DE RÉOLUTION D'UN PROBLÈME DE STATIQUE PAR STATIQUE GRAPHIQUE.....	30
FIGURE 21. CAPTURE D'ÉCRAN DE LA PREMIÈRE FENÊTRE DANS ROBOT MILLENIUM : MENU DE CHOIX DES TYPOLOGIES D'ÉTUDE ET MODULE.....	31
FIGURE 22. CAPTURE D'ÉCRAN D'UN ESPACE D'ANALYSE : EXEMPLE SUR UN PORTIQUE.....	31
FIGURE 23. EXEMPLE D'ÉTUDE: L'ACTION DU VENT SUR UN PORTIQUE SIMPLE.	32
FIGURE 24. EXEMPLE D'ÉTUDE DE COMPORTEMENT STATIQUE D'UNE POUTRE SOUS-TENDUE. (SOURCE: WWW.ICAB.FR).....	32
FIGURE 25. EXEMPLES D'ÉLÉMENTS DANS LA BIBLIOTHÈQUE. (SOURCE: WWW.ICAB.FR).....	32

FIGURE 26. EXEMPLE DE COMPORTEMENT NON LINÉAIRE : LE CÂBLE.	38
FIGURE 27. EXEMPLES DE TYPOLOGIES MÉCANIQUES DE STRUCTURES D'APRÈS MOORE [MOO1999].....	40
FIGURE 28. RELATION ENTRE LES ENSEMBLES DE MATÉRIAU VIS-À-VIS DU RAPPORT DISSIMULÉ/APPARENT.....	41
FIGURE 29. TABLEAU DES CRITÈRES POSSIBLES LIÉS À LA NATURE DU MATÉRIAU.....	42
FIGURE 30. TABLEAU DES CRITÈRES POSSIBLES LIÉS AU CONTEXTE.....	42
FIGURE 31. CHOIX DU MATÉRIAU : CONSÉQUENCES ET INFLUENCES D'APRÈS EDWARDS (CF. ANNEXES).....	43
FIGURE 32. LA PORTÉE COMME CONTRAINTE ARCHITECTURALE: TROIS ÉTAPES DE DÉTERMINATION.....	44
FIGURE 33. EXEMPLES DE CHARGES APPLIQUÉES À UN BÂTIMENT. [CHI1975]... 45	
FIGURE 34. CARTE DES VENTS DE 1998.	45
FIGURE 35. SCHÉMA DE RÉDUCTION DES INCERTITUDES PAR ENRICHISSEMENT D'ÉNONCÉ.....	46
FIGURE 36. SCÉNARIOS POSSIBLES DE PROBLÈMES DE DÉTERMINATION DE STRUCTURE DE TYPE ESQUISSE.....	46
FIGURE 37. EXEMPLE D'INTERPRÉTATION D'UNE SOLUTION BRUTE :.....	50
FIGURE 38. UN EXEMPLE « BOIS » D'INTERPRÉTATION D'UNE FORME BRUTE. CENTRE NAUTIQUE DE SÈTE, ARCHITECTES : CARDUNER ET ASSOCIÉS, 1995. (SOURCE IMAGE SUPPORT : [SB5-1995]).....	50
FIGURE 39. EXEMPLE DE STRUCTURE TRIDIMENSIONNELLE: UN COMPTOIR FORESTIER À MANCHE EN FAMENNE, BELGIQUE, ARCHITECTES: SAMUN ET ASSOCIÉS, 1996. (SOURCE: [SB10-1996]).....	51
FIGURE 40. EXEMPLE DE STRUCTURE RÉPÉTITIVE: SALLE D'EXPOSITION D'UN MAGASIN À HERGATZ, ALLEMAGNE, ARCHITECTE: BAUMCHLAGER ET EBERLE, 1999. (SOURCE: [SB26-1999]), PHOTOGRAPHIE ACCOMPAGNÉE D'UN SCHÉMA DE RÉPÉTITIVITÉ PAR TRANSLATION.....	51
FIGURE 41. CAPTURE D'ÉCRAN DE LA FENÊTRE D'ACCUEIL DE CABRI.....	52

FIGURE 42. ESPACE DE PROGRAMMATION DE CABRI.....	52
FIGURE 43. SCÉNARIO CHOISI POUR LA DÉMONSTRATION DU PROTOTYPE....	53
FIGURE 44. EXEMPLE DE NOUVEAU SCÉNARIO ISSU D'UNE MISE EN COMMUN DE L'ÉNONCÉ ET DE LA SOLUTION SATISFAISANTE D'UN PROBLÈME PRÉCÉDENT COMME NOUVELLES INTENTIONS.....	53
FIGURE 45. LES DONNÉES (INTENTIONS, SOLUTIONS ET ÉLÉMENTS DE LA STATIQUE GRAPHIQUE) ET LEURS APPORTS (NOUVELLES DONNÉES) SUR LE PROBLÈME PROPOSÉ ET SA SUITE POSSIBLE.	54
FIGURE 46. EXEMPLES D'ÉLÉMENTS DU LANGAGE DE DESCRIPTION DU PROTOTYPE.....	55
FIGURE 47. CAPTURE D'ÉCRAN DE LA ZONE DE PROGRAMMATION, PAR GÉOMÉTRIE, DU PROTOTYPE.....	56
FIGURE 48. LES ÉLÉMENTS MANIPULABLES DU PROTOTYPE.....	56
FIGURE 49. EXEMPLES DE RÉSULTATS POSSIBLES.....	57
FIGURE 50. EXEMPLES DE RÉSULTATS POSSIBLES AU SCÉNARIO DE PROBLÈME CHOISI.....	58
FIGURE 51. LE MOMENT FLÉCHISSANT MAXIMUM SUR L'ÉPURE DE L'OUTIL....	58
FIGURE 52. RELATION ENTRE LE MOMENT FLÉCHISSANT ET LA SECTION.....	58
FIGURE 53. CAPTURE D'ÉCRAN DE L'OUTIL SUR L'EXEMPLE DU SCÉNARIO CHOISI AVEC ILLUSTRATION DE DIMENSIONNEMENT SUR LE BOIS.....	59

9 ANNEXES

9.1 Les compte rendus d'entretien.

Entretiens avec des architectes.

François LAUSECKER : architecte à Gérardmer travaillant essentiellement sur la région. A la tête d'une société de logiciels pour les architectes sur le bois : WoodEngine. Se veut plus ingénieur qu'architecte.

Jean-Christophe MONJARDET : architecte de Nancy intervenant principalement sur les environs. A la tête de l'agence : deux associés. Quelques projets connus : La maison de l'enfance à Senones (88) et le centre de l'enfance à Jarville-la-Malgrange (54) : deux projets bois dont l'un à structure mixte apparente.

Entretiens avec des ingénieurs.

M. LOTH : ingénieur dans le bureau d'étude AIC Ingénierie de Nancy. Travaille avec des architectes locaux.

Mitsu EDWARDS : maître ingénieur de l'université de Leeds travaillant à RFR, bureau d'étude pluridisciplinaire : ingénieurs, architectes, ingénieurs architectes.

Entretien avec des ingénieurs/architectes.

Laurent BECKER : ingénieur dans l'agence d'architecture et d'ingénierie MARC MIMRAM à Paris. Grande variété de projets nationaux et internationaux.

9.2 Les classifications.

Classification de Salvadori [SAL1976].

Classification de Paulin [PAU2001].

Classification de Moore [MOO1999].