

Modélisation des structures : Une science (in)exacte

Luca Sgambi

Au cours d'une leçon de "mécanique des matériaux et de la fracture", le professeur Giulio Maier (professeur émérite de l'université Politecnico di Milano), nous donna une magnifique définition de l'ingénierie des structures. Une définition si belle que je décidai de la transcrire dans mon cahier. Vingt ans après, je la connais encore par cœur et je la cite souvent à mes étudiants.

« L'ingénierie des structures est un art. L'art de savoir analyser les structures en appliquant une mathématique qui n'est pas encore en mesure de nous fournir des solutions exactes, l'art de pouvoir utiliser des matériaux que nous ne connaissons pas encore parfaitement, l'art de prendre en considération des charges que nous ne serons jamais capables de prévoir. Le tout avec une simplicité qui doit rester un mystère pour le grand public. »

Du point de vue de l'ingénieur et du chercheur que je suis, la définition est à mon sens belle mais surtout vraie. Vraie dans sa deuxième partie, parce qu'un ingénieur vraiment doué est capable de réduire le comportement d'une structure à quelques concepts très simples. Une opération qui, à première vue, pourrait sembler banale mais qui ne l'est pas. En effet, un bon ingénieur tout en étant parfaitement conscient des incertitudes qui caractérisent sa profession, doit néanmoins être capable d'éliminer de ses raisonnements toutes les informations, théories et problèmes n'ayant rien à voir avec l'étude du problème structurel en question pour se concentrer sur les mécanismes véritablement importants. Vraie dans sa première partie, parce que l'ingénierie des structures (contrairement à ce qu'en pense la plupart des personnes) n'est pas une science exacte. Dans le cadre de ces réflexions que je suis en train de rédiger, je souhaite m'attarder justement sur la première partie de la définition et l'associer à l'activité de modélisation des structures, une activité qui aujourd'hui revêt une importance significative dans l'ingénierie des structures.

La modélisation des structures

Le processus de modélisation des structures est essentiellement un processus de représentation. À l'instar d'un architecte cherchant à représenter un bâtiment à travers des plans, des élévations et des sections, un ingénieur essaie de représenter un comportement structurel avec des lois mathématiques. Bien que les deux fassent leurs représentations dans des buts très différents (dans le premier cas, faire comprendre les fonctions des lieux et dans le deuxième, interpréter la réalité), il existe une analogie très forte unissant les deux activités : dans les deux cas, il s'agit de représentations approximatives de la réalité. Pour faciliter les choses, nous pouvons subdiviser le processus de modélisation des structures en trois phases (cf. figure 1).

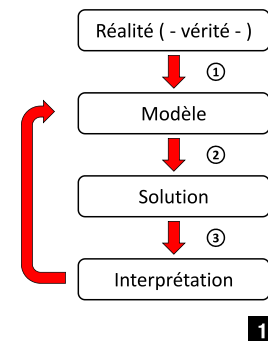
La première phase est la véritable phase de modélisation des structures. Une structure déjà construite, ou à construire, est reproduite à l'aide d'un modèle mathématique dans un ordinateur. Pendant cette phase, l'ingénieur doit se poser toute une série de questions pour mieux cerner le problème, à savoir :

- Pourquoi ? – Pourquoi ai-je besoin d'un modèle mathématique de cette structure ? Quels sont les résultats que je souhaite obtenir ?
- Comment ? – Quelles sont les théories de la mécanique informatique que

je souhaite utiliser ? Quel est le niveau d'approximation que je souhaite atteindre ?

- Combien ? – Quelle doit être l'étendue du modèle de la structure ? Quelles sont les parties que je suis obligé de modéliser et quelles sont les parties que je peux exclure du modèle ?

Cette première phase de modélisation des structures est fondamentale parce qu'un modèle mal construit fournira des résultats très approximatifs ou totalement erronés. Rappelons à ce sujet le commentaire de William D. Mellin (informaticien de l'armée américaine) concernant une question qui avait été posée à Charles Babbage (premier scientifique qui, dès 1800, imagina de mettre au point un calculateur programmable) : "Mr. Babbage, si vous saisissez des chiffres incorrects dans la machine, celle-ci fournira-t-elle de bonnes réponses?"¹. Ou principe GIGO, à savoir que si des déchets sont entrés dans le calculateur, il n'en sortira que des déchets : "Garbage in, Garbage out."² À l'heure actuelle, l'intelligence artificielle a fait d'énormes progrès et nous pouvons même imaginer qu'à l'avenir l'ordinateur pourra aider et guider l'ingénieur dans son raisonnement comme celui pour la modélisation des structures. Nous sommes malheureusement encore loin de cette *collaboration* entre l'humain et la machine. Par ailleurs, et là encore je dois répéter *malheureusement*, un grand nombre des programmes généralement utilisés par les architectes et les ingénieurs, et servant essentiellement à des-



1 Les phases du processus de modélisation des structures.

1 - BABBAGE C. (1864). *Passages from the Life of a Philosopher*. Longman and Co.

2 - (1957). *Work With New Electronic 'Brains'*. *Opens Field For Army Math Experts*. The Hammond Times, Indiana, USA.



2

2 Modélisation par éléments finis d'une colonne en béton armé préfabriquée.

3- SGAMBI L. (2005). "Handling the model approximations and the human factors in complex structure analyses". Proceedings of the Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Rome, Italy, Civil-Comp Ltd.

4- SGAMBI L., ZAMBELLI S., PAGANI C. & BONTEMPI F. (2011). "Experimental and Numerical Assessment of a Special Joint Connection for Precast Columns". Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Seoul, Korea. Techno-Press.

siner ou à recueillir et gérer des informations, ont commencé à offrir la possibilité de créer un modèle structurel du dessin réalisé, en enfonçant tout simplement une touche. Une pratique, extrêmement répandue parmi les étudiants et les professionnels, qui permet de passer totalement outre cette première phase du processus de modélisation et qui fait un amalgame dangereux, pour reprendre l'analogie faite en début de paragraphe, entre le but d'une représentation architecturale et celui d'une représentation mathématique.

La deuxième phase du processus de modélisation des structures est la résolution mathématique du modèle. Un comportement structurel est étudié en résolvant (dans le cas de modélisation aux éléments finis) un système linéaire d'équations algébriques. Au cours de cette phase, l'ingénieur chargé de la modélisation des structures, n'a pas d'autre choix que d'attendre les résultats des analyses.

Les ordinateurs sont chaque jour plus puissants. Cela est d'une part positif, puisqu'aujourd'hui nous pouvons faire sur nos ordinateurs des analyses qui, il y a trente ans, étaient la prérogative des grands centres de calcul. Mais d'autre part, cela est négatif, car nous perdons peu à peu la bonne pratique du raisonnement. Si les ressources sont limitées, l'ingénieur est obligé de penser quelles parties de la structure modéliser, comment et pourquoi. Autant de questions qui aujourd'hui sont mises de côté en faveur d'une modélisation du tout et dont on ne sait plus comment elle est faite (pour s'en rendre compte il suffit de lire les recherches publiées sur LinkedIn par de jeunes ingénieurs).

La troisième phase du processus de modélisation prévoit l'interprétation des résultats obtenus par l'ordinateur. Cette phase est la plus délicate des trois. Les résultats obtenus, qui ne seront jamais exacts, sont interprétés en tenant compte des théories mathématiques utilisées dans la première phase et des objectifs que l'ingénieur s'est fixés. Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants (par exemple, si le résultat est jugé comme trop approximatif, ou en cas de comportement structurel inattendu), il est nécessaire de reprendre la première phase pour modifier le modèle mathématique jusqu'à obtenir une réponse convaincante. Au cours de cette troisième phase, comme dans la première, le raisonnement humain est fondamental et demande du temps.

À titre d'exemple personnel, la figure 2 représente deux images du modèle numérique d'une colonne en béton armée reliée à une fondation par des connecteurs en acier. Cette modélisation fut effectuée pour reproduire numériquement

le comportement expérimental de la colonne soumise à une charge cyclique, testée auprès du laboratoire européen de Pavie "Eucentre". Le modèle numérique prévoyait la résolution d'un système d'équations algébriques de 70 000 équations avec autant d'inconnues, résolu plusieurs centaines de milliers de fois pour suivre le comportement de la structure dans les différentes phases de chargement et déchargement³. L'élaboration (deuxième phase du processus de modélisation des structures) effectuée en 2011 sur un ordinateur ordinaire, a demandé 3 journées de travail machine. La définition du modèle final et l'interprétation des résultats (phases 1 et 3) ont demandé 4 mois de travail pour un humain.

Perception de l'activité de modélisation par la société

L'expérience illustrée à la fin du paragraphe précédent, contraste très nettement avec la façon dont la société perçoit l'activité de modélisation des structures (non seulement les gens ordinaires, mais également les avocats, juges, étudiants et (certain) ingénieurs). Pour les personnes qui n'ont pas d'expérience en la matière, la première et la troisième phase perdent sensiblement d'importance, contrairement à la deuxième phase, à savoir le travail de l'ordinateur (la partie la plus frappante de tout le processus), qui gagne d'importance. Mais la première et la troisième phase sont nettement les plus importantes, et cela pas seulement du point de vue du temps qu'il faut leur consacrer.

Du point de vue des erreurs et des approximations, comme nous l'avons déjà souligné au paragraphe précédent, la deuxième phase est celle qui présente le moins de risques. En effet, une fois les erreurs numériques éliminées liées à l'usage d'une quantité finie de chiffres dans l'ordinateur (aujourd'hui avec les nombres en virgule flottante en double, ou plus, précision ce type d'erreur ne représente presque jamais un problème) et après avoir supprimé les approximations sur la convergence des éventuelles procédures non linéaires (qui n'existent que si le problème étudié n'est pas linéaire), la solution des équations algébriques, par ordinateur, a une précision que nous pourrions définir comme exacte. Au contraire, la première et la troisième phase, pour lesquelles l'humain doit directement intervenir avec le raisonnement, sont pleines d'approximations et contiennent un risque élevé d'erreurs⁴.

Malheureusement, la perception sociale faussée de l'activité de modélisation

des structures, liée presque exclusivement à la deuxième phase, amène de nombreuses personnes à penser qu'une analyse effectuée avec l'ordinateur est une analyse exacte. Rien de plus faux.

L'espace de la représentation et la relation entre les différents modèles

Nous démontrerons ci-après qu'il est possible, en jouant avec différentes modélisations d'une structure relativement simple (une poutre reposant sur deux supports), d'obtenir des résultats assez différents et qu'il n'existe pas une *recette* unique pour la réalisation d'un modèle de structure. Avant de nous concentrer sur l'exemple, nous allons introduire un espace abstrait où nous pourrions placer les différentes modélisations des structures qui seront faites. Cet espace a été conçu par le professeur E. Arielli de l'université IUAV de Venise⁵, pour l'étude des relations entre les différentes représentations d'un objet physique (un parapluie, une table, une construction...). Nous généraliserons les concepts définis par Arielli afin de pouvoir appliquer cet espace également aux modèles des structures.

Arielli définit l'espace des représentations comme un espace à deux dimensions avec, comme axes coordonnés, l'axe de la complétude et l'axe de la concrétisation. En effet, la représentation d'un objet réel peut être plus ou moins complète, en fonction du nombre des parties de l'objet réel qui sont représentées, tandis qu'une représentation peut être plus ou moins concrète en fonction du niveau de détail de la représentation.

Dans ce paragraphe, seront présentés différents modèles de structures réalisés dans le but de calculer les moments fléchissants en milieu et aux extrémités de la poutre indiquée sur la figure 4 faisant partie d'un immeuble résidentiel de 20 étages. Les modèles seront différents en fonction de la complétude et de la concrétisation que nous pourrions attribuer à chacun d'entre eux.

Le modèle de structure le plus simple auquel nous pouvons penser (modèle 1), est la modélisation uniquement de la poutre en utilisant des éléments finis de type *beam* et des appuis encastres aux extrémités (cf. figure 5). Cette modélisation représente la partie minimale de la structure que nous devons modéliser pour être en mesure de pouvoir calculer le moment fléchissant dans la poutre. La poutre est physiquement un objet tridimensionnel schématisé par un modèle à une dimension selon la théo-

rie habituelle des poutres d'Eulero-Bernoulli. Les appuis sont schématisés en encastrements parfaits et les charges sont schématisées comme des charges distribuées (le poids propre de la poutre) et des charges concentrées (les charges qui vont des poutres secondaires à la poutre). En termes de complétude et de concrétisation, cette représentation est le minimum pour pouvoir obtenir un résultat significatif.

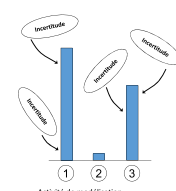
Pour augmenter le niveau de complétude de la représentation, nous pouvons améliorer la représentation des appuis. L'appui d'une structure est en effet la simplification mathématique du monde extérieur au modèle qui empêche la structure de bouger. En l'occurrence, l'encastrement de droite représente la connexion avec la cage d'escalier du bâtiment, tandis que l'encastrement de gauche représente le raccord avec une colonne. Un appui parfait n'étant jamais en mesure de représenter exactement la rigidité d'une structure non modélisée (une structure infiniment rigide n'existe pas), la représentation de l'appui est donc toujours approximative. S'il est vrai que la rigidité en flexion des murs en béton de droite peut être schématisée par un appui d'encastrement, il n'en va pas de même pour la rigidité en flexion de la colonne de gauche, très inférieure.

Il est possible d'améliorer la schématisation de l'appui de gauche en le représentant comme deux demi-colonnes avec des charnières aux extrémités (Figure 6). Cette schématisation se justifie par le fait que le diagramme du moment fléchissant, dans les colonnes d'un grand bâtiment ayant uniquement des charges verticales le long des poutres, résultante linéaire avec un point nul situé au centre des colonnes (pour les parties du bâtiment loin du rez-de-chaussée et du dernier étage).

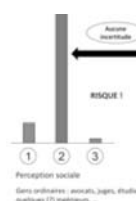
Pour les parties du bâtiment proches du rez-de-chaussée et du dernier étage, l'influence du contour déplace la position du point nul et cette représentation, en règle générale, n'est plus valable. Le modèle numérique ainsi créé (modèle 2) est un peu plus complet que le premier (une partie en plus de la structure a été représentée) mais le niveau de concrétisation reste identique : la structure reste modélisée avec des éléments finis de type *beam*, les appuis sont toujours parfaits, la modélisation des charges ne change pas.

Si l'on souhaite améliorer encore plus la représentation du comportement des structures, nous pouvons modéliser la demi-ossature sur toute sa hauteur (modèle 3, cf. figure 7).

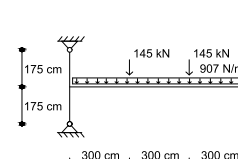
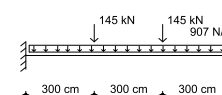
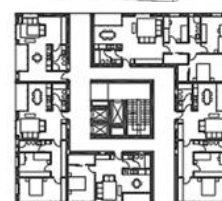
De cette façon, l'effet de rigidité en flexion de la colonne est correctement



Activité de modélisation



Perception sociale



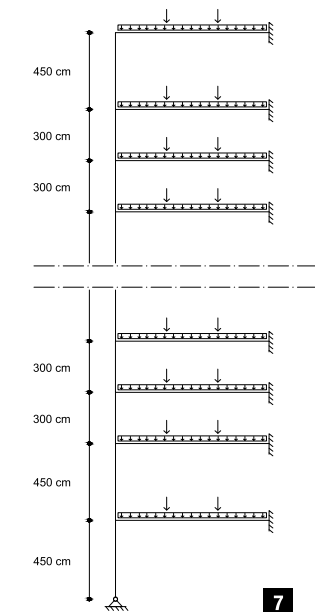
3 La perception de l'activité de modélisation.

4 Plan d'architecture et emplacement de la poutre prise en considération.

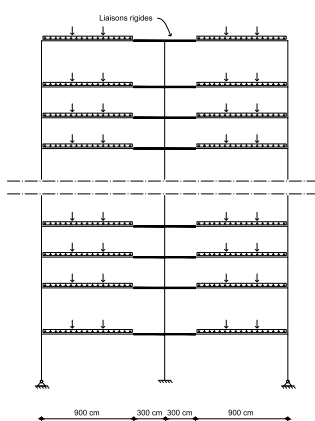
5 Schématisation du modèle 1.

6 Schématisation du modèle 2.

5 - ARIELLI E. (2003). *Pensiero e progettazione*. Mondadori.



7



8

représenté sur tous les étages. La représentation résulte encore plus complète, bien qu'ayant le même niveau de concrétisation des modèles précédents. À souligner qu'avec la troisième modélisation, le problème change de complexité. En effet, si les deux premiers modèles peuvent être résolus avec un papier et une petite calculatrice (il faut résoudre un système d'équations linéaires de quatre équations à quatre inconnues dans le modèle 1 et de cinq équations à cinq inconnues dans le modèle 2), pour le troisième il est nécessaire d'utiliser un ordinateur (puisque'il est nécessaire de résoudre un système d'équations avec, au moins, cent-une équations à cent-une inconnues).

Enfin, toujours dans le cadre d'une modélisation avec des éléments finis de type *beam*, nous pouvons modéliser toute l'ossature (modèle 4) en utilisant des liaisons rigides pour représenter l'encombrement de la cage d'escaliers centrale (une information qui ne peut être contenue dans la modélisation de la cage d'escalier comme élément unidimensionnel de type *beam*). Ce quatrième modèle est encore plus complet que les précédents tout en conservant le même niveau de concrétisation (cf. figure 8).

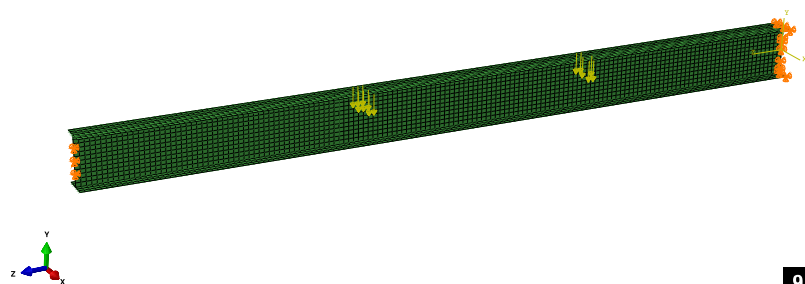
Pour en revenir au modèle initial de la poutre simple, nous pouvons penser à améliorer la représentation en nous concentrant plutôt sur la concrétisation, au lieu de la complétude, comme nous l'avons fait jusqu'à présent. Le modèle 5 représente la modélisation de la poutre à travers des éléments finis de type *shell* (cf. figure 9). En termes de complétude, le modèle 5 représente la même partie de structure que le modèle 1, mais en termes de concrétisation, le nouveau modèle est beaucoup plus riche. La poutre n'est plus modélisée de façon unidimensionnelle, selon la théorie d'Eulero-Bernoulli, mais à travers une représentation qui commence déjà à être tridimensionnelle (l'épaisseur des éléments *shell* reste de toute façon de zéro, la tridimensionnalité n'est donc pas encore représentée dans toutes ses parties). Cette nouvelle représentation permet de comprendre des comportements qu'un modèle unidimensionnel

n'avait pas réussi à mettre en lumière (perte de forme de la section, déformabilité tranchante, diffusion locale des efforts...). Par ailleurs, les appuis peuvent être modélisés avec une plus grande précision : sur la section de gauche, un appui à charnière sur tous les nœuds peut représenter un raccord soudé, tandis qu'à droite, les connecteurs de raccord avec le béton peuvent être représentés chacun par un appui à charnière. Les charges concentrées peuvent être représentées par des pressions sur des surfaces d'une grandeur bien précise, équivalent à l'encombrement de l'appui des poutres secondaires.

Bien entendu, il est possible d'enrichir le modèle 5 en se déplaçant le long de la coordonnée de la complétude, et en construisant un modèle identique au modèle 2 mais avec des éléments finis de type *shell* (cf. figure 10). Les modèles 5 et 6 ne peuvent être résolus qu'à l'aide d'un ordinateur puisque'il est nécessaire de résoudre, même pour une seule poutre, des systèmes linéaires avec plusieurs milliers d'équations.

La figure 11 regroupe 6 modèles sur le plan cartésien complétude-concrétisation des représentations proposé par Arielli. À noter que les modèles proposés ne sont certainement pas les seuls à pouvoir être conçus. Par exemple, il est possible de tenir compte de toute l'ossature tridimensionnelle de la structure pour avoir un modèle plus complet et utiliser une modélisation basée sur des éléments finis de type *solid* pour avoir un modèle plus concret (et réellement tridimensionnel).

Il est possible aujourd'hui de construire des modèles très complets et très concrets, de façon (presque) automatique en partant directement des plans architecturaux ou des modèles virtuels 3D paramétriques. Ces modèles sont souvent utilisés par les vendeurs de logiciels pour promouvoir leurs produits en mettant l'accent sur la ressemblance du modèle mathématique avec la structure réelle. Mettre l'accent sur la facilité avec laquelle on passe d'un modèle architectural à un modèle structural ne fait que

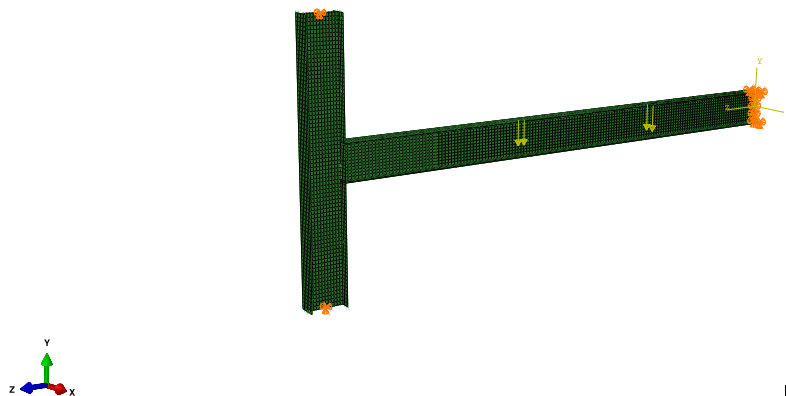


9

7 Schématisation du modèle 3.

8 Schématisation du modèle 4.

9 Schématisation du modèle 5.



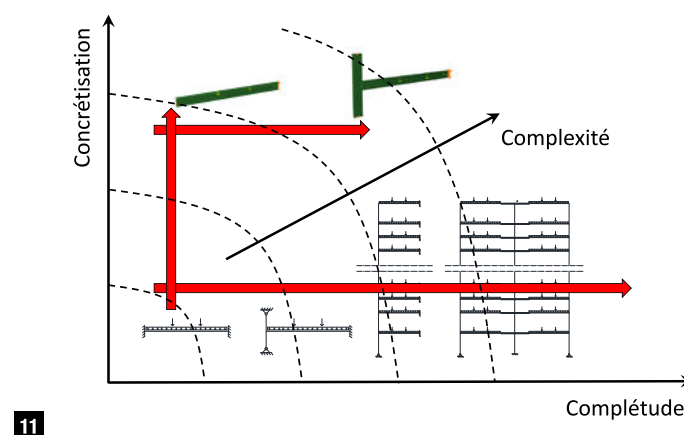
renforcer la perception sociale sur l'activité de modélisation soulignée sur la figure 3. La question à laquelle je souhaiterais répondre dans le paragraphe suivant est: "un modèle complet et concret est-il toujours le meilleur?". Nous verrons que la réponse à cette question ne pourra être que négative pour différentes raisons.

Critique aux modèles de structure exposés

Tous les modèles illustrés au paragraphe précédent sont publiés dans des ouvrages sur la modélisation des structures ou des ouvrages techniques des constructions et peuvent tous être utilisés dans la pratique professionnelle. La différence de résultats, tenant compte de la valeur du moment fléchissant sur les lignes axiales et aux extrémités des poutres, est de l'ordre de 10-30 %, en fonction de l'emplacement de la poutre dans la construction (différences majeures pour les poutres des derniers

étages). Quel est le bon modèle ? En principe, tous les modèles illustrés pourraient être corrects mais également sujets à critiques.

Le modèle 1 et son similaire avec les appuis à charnières au lieu des encastrements, a été le cheval de bataille des ingénieurs des structures pendant de nombreuses années, avant les débuts de l'époque de la modélisation des structures par éléments finis. Les solutions, en termes de moment fléchissant et d'effort tranchant, sont connues et reportées dans de nombreux ouvrages. Leur utilisation a toujours tranquilisé l'ingénieur parce qu'une modélisation consciemment peu complète et peu concrète permet de calculer en excès les plus importantes valeurs de moment fléchissant et d'effort tranchant de la poutre. Cette sécurité et la vitesse de réponse que l'ingénieur était en mesure de fournir (également sur le chantier), a amplement pallié le manque de réalité de la modélisation et, je pense pouvoir affirmer sans crainte, que la plupart des bâtiments que nous voyons aujourd'hui a été projetée avec des modélisations de



10 Schématisation du modèle 6.

11 Rapports de complétude et concrétisation entre les différents modèles proposés.

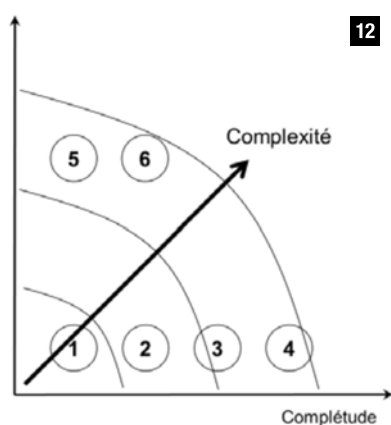
ce type (en ajoutant le modèle à poutre continue sur plusieurs appuis, pas considéré dans cet article).

Le modèle 2 est déjà un modèle plus complet mais dont les raisonnements de support se basent sur la mécanique des structures. Ce modèle est plus riche que le numéro 1 mais doit être adapté à l'étage concerné à l'intérieur du bâtiment. Malheureusement, celui-ci s'adapte moins rapidement aux cas spécifiques et les solutions toutes prêtes sont beaucoup plus difficiles à trouver dans les manuels. En effet, les actions internes dépendent du rapport des rigidités entre la poutre et la colonne, avec par conséquent une infinité de possibilités. Le modèle doit être adapté aux différentes poutres du projet.

Le modèle 3 est en fait plus approximatif que le modèle 2 (voire même erroné). Dans la course au modèle le plus complet que nous avons fait au paragraphe précédent, nous nous sommes laissés emporter par la *généralisation géométrique* sans raisonner en termes physiques. Comme déjà illustré précédemment, les deux premiers modèles et le troisième sont sensiblement différents. Les deux premiers sont en effet le fruit d'une résolution traditionnelle *de tête* des schémas statiques, tandis que le troisième a imposé l'utilisation d'un ordinateur. Il ne faut pas oublier qu'un logiciel de modélisation des structures se base sur des théories plus générales par rapport à celles utilisées pour la résolution *de tête* des schémas statiques. Dans cette résolution la colonne est considérée comme indéformable du point de vue axial tandis que dans le cas d'une résolution avec un ordinateur, la colonne a sa déformabilité. Ce qui provoque une réduction de la colonne de gauche, écrasée par la charge des poutres, tandis que l'appui de droite reste dans sa position, car parfaitement rigide (alors qu'en réalité, la cage d'escalier possède sa propre déformabilité axiale et doit être modélisée elle-même). Cette erreur de modélisation génère des moments fléchissants un peu trop hors norme, surtout dans la partie haute du bâtiment où l'abaissement de la colonne de gauche

est plus marqué. Le modèle 3, bien que mentionné dans d'anciens ouvrages sur la mécanique des structures, est un modèle qui est adapté aux petits bâtiments mais pas aux grands, comme dans notre cas. Ou pour être plus précis, il peut convenir dans le cadre d'une résolution *de tête* de la structure (impossible à le faire), où n'est considérée que la déformabilité fléchissante de la colonne.

Pour éviter cette erreur de modélisation, le modèle 4 introduit également dans la représentation la modélisation de la cage d'escalier. Néanmoins, si le modèle 1 ne dépend pas de la rigidité de la poutre, il en va autrement du modèle 4. Pour pouvoir utiliser le modèle 4, il est nécessaire de disposer déjà d'un pré-dimensionnement des sections des poutres (également effectué avec le modèle 1) et des colonnes. Le modèle 4 est un modèle beaucoup plus complet que les modèles 1 et 2, mais c'est justement la raison pour laquelle il peut être critiqué. La construction du modèle se base en effet sur l'hypothèse de *continuité structurelle*, une hypothèse qui n'est jamais vérifiée dans la réalité. Par exemple, la déformabilité des connecteurs dans une structure en acier et la fissuration dans une structure en béton, ont une certaine influence sur les valeurs des actions internes évaluées sur la base de l'hypothèse d'une continuité du matériau. En d'autres termes, le modèle 4 donne au modèle structurel une continuité qui dans la réalité n'existe pas. La personne effectuant l'analyse doit être en mesure d'évaluer l'importance des hypothèses faites, ou adoptées, de façon implicite. Les modèles 5 et 6, bien que très concrets, fournissent en substance des résultats similaires aux modèles 1 et 2. Par ailleurs, les résultats d'un modèle à *shell* ne sont jamais en termes d'actions internes mais d'efforts locaux, ce qui implique de devoir intégrer par la suite les résultats pour obtenir les grandeurs utilisées dans la conception de poutres et de colonnes (le moment fléchissant et l'effort tranchant).



Au vu des réflexions faites dans le paragraphe précédent, nous pouvons affirmer que plus le modèle est complet et concret, plus il est complexe (nécessité d'avoir plus d'informations pour bien fonctionner, informations que souvent nous n'avons pas). Un modèle très complet et très concret exige une attention majeure et une plus grande capacité de critique de la part des personnes chargées de l'analyse (cf. figure 12).

Quelques réponses aux questions posées

Le niveau de complétude et de concrétisation d'une modélisation dépend du but de la modélisation elle-même et des caractéristiques de la structure à modéliser. Dans le deuxième paragraphe de cet article, on a posé des questions auxquelles il faudrait réfléchir avant de commencer une activité de modélisation des structures.

Pourquoi dois-je réaliser un modèle de la structure ? Si la réponse est, pour analyser les actions à l'intérieur d'un bâtiment de 2 ou 3 étages, le modèle 1 suffit. Si le bâtiment a plus de 10 étages (et n'a aucun comportement en torsion), le modèle 4 est l'idéal mais devrait être accompagné de modèles plus simples, comme le modèle 2 ou le modèle 1. Si le modèle doit servir à analyser les efforts d'un raccord avec des connecteurs ou

la répartition de la charge d'une poutre secondaire, les modèles 5 et 6 sont parfaits.

Comment dois-je réaliser le modèle ? Si la structure est composée d'une ossature fine, il est en général possible d'utiliser les éléments finis basés sur la théorie de la poutre de Bernoulli-Navier (comme le modèle 4 par exemple). Si la hauteur des poutres commence à devenir importante, il vaut mieux utiliser des éléments finis basés sur des théories qui tiennent également compte de la déformabilité tranchante (la théorie de la poutre de Timoshenko). Si la hauteur de la poutre est encore plus grande, le concept même de *poutre* se perd, et il est nécessaire d'utiliser un modèle plus concret basé sur des éléments finis de type *shell* (modèles 5 et 6) ou de type *solid*.

Quelle doit être son étendue ? Suffisante pour pouvoir analyser les résultats avec un bon degré d'approximation. Dans une structure avec une ossature doublement symétrique, les effets de torsion sont en règle générale assez réduits et la modélisation à ossature en plan donne des résultats acceptables, tant pour les charges verticales, que pour les charges horizontales (vent). Le modèle 4 est donc justifiable face à un modèle tridimensionnel plus onéreux. Mais, si l'effet à analyser est celui de la répartition d'une charge ou les efforts dans un couvre-joint d'acier, il est alors inutile de modéliser toute la structure.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que la modélisation des structures, tout comme l'ingénierie des structures (ou la science de construire pour reprendre les termes de Viollet-le-Duc), n'est pas seulement une science, mais aussi tout un art. Ce sont en effet les connaissances, l'expérience et la sensibilité qui guident un ingénieur (ou un architecte) dans la définition d'un modèle de structure avec le meilleur rapport complétude / concrétisation pour représenter une réalité physique que nous ne serons jamais en mesure de connaître parfaitement.

¹² Augmentation de la complexité du modèle.