

Dominique RAYNAUD*

Le schème : opérateur de la conception architecturale

L'étude de la conception architecturale se trouve au carrefour de trois approches : sciences de la conception, psychologie cognitive et architecturologie. Cette dernière tente de modéliser toute la gamme des changements d'état qui apparaissent durant le processus de conception. L'architecturologie sait décrire, au moyen d'échelles, les opérations de conception par lesquelles l'architecte attribue des mesures à l'édifice. Cette modélisation paraît adéquate lorsque le modèle morphologique n'est pas transformé durant le processus de conception (comme dans certains projets de Jørn Utzon ou de Alvar Aalto). Dans d'autres cas — comme dans certains projets de Philibert de l'Orme, Ludwig Mies van der Rohe, Norman Foster — les changements d'état altèrent la structure même du modèle morphologique. De telles transformations ne peuvent plus être décrites par l'échelle. Reprenant une idée de Herbert A. Simon, l'article suggère que la description de ces nouvelles transformations appelle une autre classe d'opérateurs. Ce pourrait être des schèmes, si l'on entend par ce terme la classe des actions prototypiques qui peuvent être exprimées par des verbes fondamentaux comme ouvrir, fermer, séparer, lier, etc.

Mots-clés : *conception architecturale, modèle, opération, échelle, schèmes.*

Schema as an architectural design operator. *The study of architectural design bridges various approaches focusing on design sciences, cognitive psychology and architecturology. Architecturology aims to describe the full range of changes that appear during the design process. We are able to describe, by means of scales, the operations by which an architect gives size to the building. This modelling seems adequate when the morphological model is not*

* Université Pierre-Mendès-France (Grenoble) et Laboratoire d'architecturologie et de recherches épistémologiques sur l'architecture, LAREA/CNRS UMR 7544 (Paris), UFR SHS, UPMF, BP 47, 38040 Grenoble cedex 9.

E-mail : dominique.raynaud@upmf-grenoble.fr

L'auteur remercie vivement, outre les rapporteurs, Philippe Boudon et Philippe Deshayes qui ont aimablement accepté de commenter une version préparatoire de l'article.

adulterated during the design process (as in some projects of Jørn Utzon or Alvar Aalto). In other cases —as in some projects by Philibert de l'Orme, Ludwig Mies van der Rohe, Norman Foster— changes of state adulterate the very pattern of the morphological model. Such changes can no more be undertaken by scale operators. Unfolding an idea by Herbert A. Simon, it is suggested that the description of these new transformations requires another class of operators. It could be schemata, considering that this word means the prototypical actions that could be rendered by basic verbs as open, close, separate, bind, etc.

Key words: *architectural design, model, operation, scale, schemata.*

I. INTRODUCTION

La conception architecturale est aujourd'hui un objet privilégié de recherches. En témoigne le nombre et la diversité des publications sur ce thème depuis une dizaine d'années —cf. Lebahar (1983), Boudon et al. (1992, 1994, 1997), Conan (1981, 1990), Prost (1992, 1994), etc. L'intérêt suscité par cet objet d'étude semble résulter de la conjonction de trois grands courants : sciences de la conception, psychologie cognitive et architecturologie. Après un bref rappel de ces trois approches, l'article s'intéresse à la modélisation du processus de conception architecturale, sans établir une revue exhaustive des connaissances actuelles. Il traite en fait d'une question beaucoup plus limitée : celle de la descriptibilité des changements d'état du projet d'architecture. L'architecturologie décrit déjà certaines transformations par des opérations dont l'opérateur est l'échelle. L'article voudrait suggérer que, si cette modélisation est adéquate lorsque le modèle morphologique est conservé, elle est imparfaitement adaptée à la description des changements qui altèrent la structure même du modèle morphologique. Il semble alors nécessaire d'introduire une autre classe d'opérateurs, les schèmes, pour décrire ces changements d'états.

I. 1. Les sciences de la conception

La réflexion actuelle sur la conception architecturale doit beaucoup aux recherches anglo-saxonnes sur le « design », inaugurées par Herbert A. Simon [1963]. On lui doit d'avoir formulé l'idée d'une modélisation de la conception commune à l'architecte, à l'ingénieur, etc. et d'avoir mis en évidence certains processus de

pensée spécifiques aux concepteurs. En ce sens, l'essai sur «La science de la conception » (1974 [1963] : 73-103) montre que la conception architecturale est un domaine à solutions sous-optimales ou satisficing (le concepteur n'ayant en général, ni le temps, ni les ressources cognitives pour accéder à la solution optimale, à supposer que celle-ci existe); et un domaine d'heuristiques (le concepteur, ne pouvant appliquer un algorithme ou faire l'inventaire des solutions possibles, doit en général imaginer des méthodes de résolution).

Christopher Alexander, architecte et mathématicien, fut l'un des premiers à profiter des réflexions de Simon et de ses collaborateurs, et à considérer que des méthodes mathématiques pouvaient être appliquées au traitement des programmes architecturaux. Sa contribution principale concerne la décomposition de problèmes en problèmes semi-indépendants. Alexander [1964] part de la constatation que tout objet architectural est un objet complexe répondant à de multiples exigences (ou variables). La méthode proposée consiste à construire un graphe dont les sommets figurent les variables et les arcs, les relations entre les variables. Le problème initial est alors décomposé en sous-problèmes semi-indépendants, selon la partition minimisant le nombre d'arcs interceptés. Une telle décomposition permet alors de résoudre chaque sous-problème, puis de recomposer les sous-solutions obtenues en une forme globale. Quelles que soient leurs limites, les travaux de Simon [1963] et d'Alexander [1964] sont pour beaucoup dans l'idée d'une exploration rationnelle du processus de conception, et leur marque est encore perceptible dans les travaux contemporains.

I. 2. La psychologie cognitive

Le second courant utile aux recherches sur la conception architecturale est constitué par les travaux de psychologie expérimentale et cognitive. Aux premières recherches, qui visaient à caractériser des phases du processus de conception, ont succédé des recherches sur la nature même des opérations mentales et sur les situations de résolution de problème. Pratiquement, on peut parler de résolution de problème quand le sujet «recherche un moyen d'atteindre un but », cette activité étant dirigée par un but unique (gagner une partie d'échecs, résoudre une équation) ou par des buts multiples (adapter la forme d'un bâtiment aux contraintes implicites et explicites du projet). L'activité de conception peut également relever de la catégorie des « problèmes mal définis » (Holyoak, 1995), suscitant

alors un recours à l'analogie ou à l'intuition (Cauzinille-Marmèche et al. 1985 ; Metcalfe et Wiebe, 1987). Les études sur la résolution de problème se sont fait l'écho du débat sur l'imagerie mentale. Dans le sillage de la théorie analogique opposée au propositionalisme¹, les travaux de Huttenlocher (1968), Carroll, Thomas et Malhotra (1980), Denis (1989) ont maintenu l'hypothèse d'un rôle fonctionnel de l'image mentale dans la résolution de problème. Carroll et al. (1980) ont notamment montré que, dans la résolution de deux versions isomorphes d'un même problème — une version spatiale et une version temporelle —, la version spatiale, qui suscite davantage l'imagerie visuelle, entraîne de meilleures performances et un temps de résolution plus court que la version temporelle. Dans une revue des travaux consacrés à cette question, Denis écrit : « Dans la résolution des problèmes spatiaux, surtout lorsqu'ils comportent un degré élevé de nouveauté, les sujets s'appuient très spontanément sur une stratégie figurative » (1989 : 225). Cette idée, concernant l'architecte en train de concevoir, est corroborée par les observations indépendantes de Schmeidler (1965), de Hall et MacKinnon (1969), qui établissent la forte propension des architectes à recourir à l'imagerie. L'utilité de l'image mentale dans la conception provient du fait qu'elle permet d'« instancier des hypothèses », formule qui se déduit de quelques propriétés fondamentales : 1) il existe un isomorphisme entre l'image mentale et l'objet représenté, comme l'ont montré les expériences sur la transformation de l'image par rotation (Shepard et Cooper, 1982) ou par changement de taille (Bundesen et Larsen, 1975). La représentation d'un bâtiment est donc isomorphe à l'édifice réel — même si celui-ci est un objet virtuel au moment de sa conception ; 2) l'image mentale procède d'une sélection de l'information pertinente. Elle présente des différences systématiques avec le réel, en particulier quand il s'agit de « modèles mentaux » dans lesquels

¹ Depuis les années 1970, deux courants s'affrontent sur la nature des images internes. Kosslyn (1980) a défendu l'hypothèse d'un format spécifique de la représentation ; Pylyshyn (1981) a maintenu l'idée d'une réductibilité de l'image au format propositionnel. La différence entre ces conceptions s'exprime par plusieurs caractéristiques. Du point de vue syntaxique, les images sont sujettes à des relations spatiales (topologiques ou métriques) versus les noms appartiennent à des classes (entités, propriétés, relations logiques). Du point de vue sémantique, il existe une ressemblance iconique entre l'image et l'objet versus il existe un rapport arbitraire entre le nom et l'objet. Cette controverse semble aujourd'hui se conclure, sur des bases neurologiques, au détriment du propositionalisme (cf. synthèse de Kosslyn, 1994 et 1995 : 290-293).

l'information est restreinte aux seules relations utiles pour la tâche à accomplir (Leplat, 1985 ; de Vega et Rodrigo, 1997) ; 3) l'image a un degré de plasticité supérieur à celui de l'objet réel. Il est plus facile, ceteris paribus, d'augmenter la surface d'un projet que d'augmenter celle d'un édifice construit. Ces propriétés expriment l'économie des stratégies figuratives. L'imagerie permet à l'architecte de tester des hypothèses constructives plus rapidement, et d'une façon significativement moins coûteuse, que s'il devait se prononcer sur la base d'un test en vraie grandeur.

I. 3. L'architecturologie

Le troisième courant ayant suscité, et nourri beaucoup plus directement, le développement des recherches sur la conception architecturale est lié au projet d'une « architecturologie », présenté par Philippe Boudon (1971). Relevant judicieusement que les architectes entendent souvent par « théorie d'architecture » un ensemble plus ou moins lâche de propositions orientées par des jugements axiologiques (sur le beau ou sur le bien), l'auteur a proposé aux architectes de s'attacher à constituer une connaissance de l'architecture, distincte des doctrines esthétiques et des discours normatifs. Même si l'architecturologie tient à la spécificité des phénomènes qu'elle analyse, elle partage le canevas général des épistémologies constructivistes décrit par Le Moigne (1995). En atteste l'avant-propos du dossier MCX rédigé par Boudon et Deshayes (1997), où les auteurs rappellent les points essentiels des recherches sur la conception architecturale. Il conviendrait de :

1) s'intéresser à des objets virtuels (l'édifice en projet plutôt que l'édifice réalisé).

2) explorer les processus plutôt que les états (non pas les esquisses de l'architecte, mais le passage d'une esquisse à l'autre).

3) considérer ces processus sous l'angle matériel aussi bien que cognitif, approche qui met en cause le partage conventionnel entre les sciences naturelles et les sciences humaines.

4) aborder ces processus dans une perspective « poïétique » (Aristote, Valéry) impliquant la reconnaissance d'actions humaines finalisées.

Il est aisé de reconnaître que l'architecturologie adhère ici à quatre points qui définissent le programme minimum des sciences de la conception. Si elle s'en distingue, ce n'est que par quelques

inflexions, qui touchent notamment aux réticences à rattacher la conception architecturale aux situations de résolution de problème, comme le veut pourtant une longue tradition de recherche inaugurée par Newell et Simon (1972).

I.4. Limites de l'étude

Les trois approches qui viennent d'être rappelées constituent le cadre de référence des développements qui vont suivre. Si l'on admet, à la suite de Wittgenstein (1961), que les mots sont passibles d'usages plutôt que de définitions, une difficulté centrale de cet article est de tenter une articulation entre des domaines qui, pour être connexes, ne s'accompagnent pas pour autant d'un usage régulier et uniforme des notions. Par exemple, le terme de « modèle » est connu en psychologie cognitive, de même qu'en architecturologie, mais les usages de ce mot n'y sont que partiellement concordants. On a tenté de clarifier l'usage des mots chaque fois qu'une confusion de ce type pouvait apparaître, soit en rappelant l'acception du mot, soit en le contextualisant, mais en évitant, autant que possible, de recourir à des néologismes.

La conception architecturale présente certaines particularités (résolution de problèmes mal définis, à buts multiples et à solutions sous-optimales) qui la soumettent plus facilement à l'observation qu'à l'expérimentation. L'observation présente cependant des difficultés que l'on ne doit pas sous-estimer : 1) les modèles-sources et les modèles-buts d'une opération se traduisent rarement par des représentations matérielles systématiques (un architecte peut ne rien dessiner et recourir à la mémoire interne : les opérations sont alors inaccessibles à l'observation); 2) l'architecte peut effectuer simultanément plusieurs opérations élémentaires de conception ; 3) une opération élémentaire de conception répond rarement à une seule pertinence. Mais — autre différence entre les trois approches exposées — le projet d'une architecturologie expérimentale (Boudon, 1997) n'en est qu'à ses premiers pas. Il semble donc prématuré de placer les réflexions qui suivent dans ce cadre, même si la perspective d'une expérimentation ne doit pas être perdue de vue.

Les changements d'état des projets présentés dans l'article ont été reconstruits ex post facto à partir de séries chronologiques d'esquisses d'architectes. Notons les états consécutifs du projet : e_1 , e_2 , e_3 ... On est alors en droit de s'interroger sur les changements apparus entre ces états : $e_1 \textcircled{R} e_2$, $e_2 \textcircled{R} e_3$... Cette approche suppose

que le concepteur recourt à des représentations matérielles (croquis, esquisses, plans, etc.) pour fixer le résultat d'une action effectuée sur le projet, ce qui n'est pas toujours le cas, comme il a été dit. Par conséquent, les séries de documents doivent faire l'objet d'une sélection afin de pouvoir être analysées. On suppose en outre que de telles séries sont complètes, ce qui est loin d'être une caractéristique régulière des documents d'archives. On peut néanmoins estimer la complétude des séries de représentations graphiques par des critères extérieurs, tels que leur nombre et leur distribution chronologique. En bref, pour être exploitables, les séries d'esquisses doivent être sélectionnées en fonction de leur traçabilité, c'est-à-dire en fonction de la possibilité qu'elles offrent de suivre l'évolution d'un même élément architectural (escalier, poteau, etc.) à travers les représentations consécutives du projet. L'analyse des changements d'état, qui sont ainsi rendus manifestes, procède quant à elle de reconstructions rationnelles, du type de celles qui sont pratiquées en épistémologie, et qui consistent, dans ce cas précis, à chercher les raisons pour lesquelles le concepteur a introduit un changement entre deux esquisses consécutives. C'est, si l'on veut, la partie interprétative du travail. On peut fixer des critères pour que cette interprétation ne soit pas arbitraire : celle-ci ne doit pas être contradictoire avec la connaissance commune des pratiques de conception ; elle doit en outre être étayée par le témoignage, écrit ou oral, de l'architecte. Ces différents critères ont été retenus ici.

II. UN EXEMPLE D'OPERATEUR

L'architecturologie a proposé de reconnaître, dans l'activité de conception, des opérations exprimant les changements d'états que subit tout édifice en projet. Boudon et al. écrivent : « Le processus de conception est un processus diachronique qui implique une transformation progressive de ce qui est en projet et, partant, des modèles répétés. Les opérations sont ce qui règle le passage d'un état à un autre dans un tel processus » (1994 : 132). Il est utile de représenter un projet quelconque par une suite d'états (mentaux ou matériels), répartis entre un état initial et un état final du projet architectural. Entre ces extrema, toute opération de conception transforme un état-source en état-but. L'opérande et l'opérateur de ces opérations peuvent être précisés : « Le modèle est ainsi ce sur quoi portent les opérations de mesure : il est un opérande. L'opération dont il est opérande comporte un opérateur : l'échelle » (Boudon et al. 1994 : 131). On notera que, dans cette définition,

l'usage du mot opérateur correspond davantage à la tradition mathématique qu'à la tradition psychologique, pour laquelle l'opérateur est plutôt « celui » qui provoque la transformation (le concepteur, en l'occurrence). La formalisation de telles opérations est simple. Après les précisions qui viennent d'être données, on peut noter :

$$o_i(m) = m'$$

opération dans laquelle [m] représente le modèle-source, [m'] le modèle-but, [o_i] l'opérateur, dont l'indice [i] fixe la pertinence architecturologique (économique, fonctionnelle, technique, etc.) Un enchaînement de plusieurs opérations de conception peut alors s'écrire :

$$o_k(o_j(o_i(m))) = m'''$$

ou, si l'on accepte une plus grande licence :

$$o_{kji}(m) = m'''$$

Cette traduction symbolique n'est pas impérative, mais elle souligne le caractère régulier des opérations. Il reste à définir la nature de ces opérations de conception architecturale.

II.1. Définitions de l'échelle

Si opérateur et échelle sont équivalents dans la définition mentionnée supra (Boudon et al., 1994 : 131), c'est parce que la notion d'échelle est au centre des recherches architecturologiques. La grande majorité des travaux réalisés depuis les années 1970 ont traité de l'échelle, et ce, bien avant qu'elle ne soit identifiée comme un opérateur de la conception architecturale (Boudon, 1994). L'importance de l'échelle provient de ce qu'une grande partie du travail de l'architecte consiste à définir sans cesse les mesures de l'édifice projeté. Donner des mesures est, en ce sens, comme le dit l'auteur, une « fonction irréductible » de l'architecte (1992 : 102). La question qui s'ensuit est évidemment : « Comment l'architecte donne-t-il des mesures à l'espace ? » Cette question appelle un large éventail de réponses. La hauteur d'une porte, par exemple, doit prendre en compte la hauteur d'un homme. Elle est donc conçue par référence à l'échelle humaine. Sa largeur — qui diffère selon qu'il s'agit d'une porte de salle de bains ou d'une porte de chambre d'hôpital — est conçue par référence à l'échelle fonctionnelle (la porte de la chambre d'hôpital devant permettre le passage de lits

médicaux, contrainte à laquelle n'est pas soumise la porte de la salle de bains). La hauteur du linteau de la porte répond quant à elle principalement à une logique constructive : elle est donc conçue par référence à l'échelle technique. La question du « Comment... » débouche, comme on voit, sur une recension des modalités selon lesquelles l'architecte attribue des mesures à un objet architectural.

Le concept d'échelle architecturologique, qui répond à ce souhait, est passible d'une écriture « radical + désinence ». Car, de même que l'on peut écrire le mot latin *doloris* : *dolor* (radical) + *-is* (génitif), l'échelle fonctionnelle peut être définie par : « pertinence de la mesure » (radical) + « selon les usages et les contraintes fonctionnelles » (désinence). Le radical de cette définition (Boudon, 1992 : 171) souligne que la conception rentre dans le cadre des actions finalisées : la pertinence (économique, fonctionnelle, technique, etc.) constituant la visée téléologique de la mesure et le critère par lequel on juge si l'objet conçu répond ou non aux exigences initiales (ce qui n'implique d'ailleurs pas une adéquation mécanique entre les moyens et les fins, l'édifice rentrant dans la catégorie des « solutions sous-optimales »). Une vingtaine d'échelles ont été mises au jour pour rendre compte des facteurs qui dirigent l'attribution des mesures. On en trouvera un exposé dans Boudon (1992 : 134-163). Il va sans dire que cette division des échelles architecturologiques est analytique, au sens où les parties d'un ouvrage d'architecture répondent souvent simultanément à plusieurs échelles (ceci expliquant le caractère sous-optimal des solutions architecturales). Les échelles se combinent donc entre elles par juxtaposition, surdétermination ou codétermination (Boudon et al. 1994 : 198-200). Par exemple, les mesures de la porte évoquée plus haut obéissent au mode de la juxtaposition (échelle humaine pour la hauteur ; échelle fonctionnelle pour la largeur ; etc.)

Si l'on veut faire de l'échelle un outil de modélisation de la conception architecturale, il faut adjoindre à ces observations une définition fonctionnelle relative à l'échelle comme opérateur de la conception architecturale. On dira alors que l'objet de cet opérateur est de transformer un opérande de manière à le doter d'une plus grande pertinence architecturologique, au sens indiqué supra, que celle-ci suppose une évaluation qualitative de la mesure (« un séjour minuscule ») ou bien une évaluation quantitative de la mesure (« un séjour de 32 mètres carrés »). On peut, sur cette base, énoncer la synthèse suivante : le travail de conception peut être modélisé par

des opérations, dont l'échelle est l'opérateur et dont le modèle est l'opérande ; le concepteur utilise ces opérations pour accroître la pertinence de l'objet virtuel qu'il conçoit. La reconnaissance des opérations d'échelle répond à beaucoup d'interrogations à propos du travail de l'architecte. Des pans entiers de son activité peuvent être ramenés à ce cadre conceptuel. Quelques questions se posent toutefois à propos de ces opérateurs que sont les échelles, et il convient maintenant de les examiner.

II.2. Questions sur l'échelle

La principale question que suscite l'échelle surgit à la lecture des textes de référence. Les définitions de l'échelle architecturologique sont généralement articulées à la mesure. En voici un échantillon : « Le choix de l'instrument de mesure dépendra d'une pertinence et c'est cette définition qui constituera pour nous l'unité théorique du terme échelle : la pertinence de la mesure, celle qui constitue par conséquent le noyau à partir duquel sera déployée la diversité des échelles particulières » (1992 : 130). « Parmi la diversité de sens que le terme d'échelle peut recouvrir en dehors même du champ de l'architecture, j'ai choisi de m'en tenir à une définition de l'échelle entendue comme "pertinence de la mesure" » (1992 : 171, italiques de moi). Il semble cependant que l'usage du mot échelle renvoie parfois à des phénomènes qui, pour n'être pas indépendants de la mesure, n'en font plus une référence centrale. Les exemples des échelles architecturologiques donnés in Boudon et al. (1994) sont exemplaires à ce titre, puisqu'on y trouve, à côté d'échelles agissant explicitement sur la mesure de l'édifice, des échelles — échelle de visibilité (1994 : 174), de modèle (177), d'extension (179), économique (180), etc. — qui supposent une opération prioritaire ou conjointe sur de la non-mesure. Cette polysémie, qui va donc au-delà de celle que l'on trouve dans les définitions de base, suggère que l'architecturologie a perçu l'existence d'opérations qu'elle n'a pas jugé utile de définir avec précision.

Revenons ensuite au terme de « modèle » employé par l'architecturologie. Si le modèle est l'opérande d'une opération qui peut concerner, tantôt de la mesure, tantôt de la non-mesure, on est en droit de distinguer les deux cas suivants : 1) L'opération porte sur la mesure, auquel cas l'opérande se confond avec les mesures du modèle ; 2) L'opération vise à transformer un autre aspect du modèle, auquel cas le modèle est entendu en un sens plus large. Les réticences qui existent à désigner l'opérande de l'échelle par le terme

de « mesure » (en remplacement du mot « modèle »), sont un bon indice du fait que les aspects non-mesurables du modèle ont été également perçus. Dans la suite de l'article, nous parlerons donc de modèle morphologique pour désigner ce type d'opérande non réductible à la mesure, et ce, de manière à éviter toute confusion avec l'usage terminologique qui s'est imposé en architecturologie. Notons cependant que le terme se trouve alors rapproché de l'acception qu'il possède dans les sciences cognitives, en particulier sous la forme des « modèles mentaux spatiaux » (Johnson-Laird, 1983, Denis, 1997). Le modèle s'y oppose à l'idée d'une représentation propositionnelle et signifie qu'il existe un isomorphisme structural entre les caractéristiques du modèle et les propriétés spatiales de l'objet qu'il est sensé représenter. Il ressort de l'examen de ces questions qu'on ne peut exclure a priori l'existence d'autres classes d'opérateurs de la conception architecturale. Loin d'être abstraite, cette distinction correspond en fait à des situations de conception distinctes. Certains projets peuvent nous aider à en percevoir le fondement.

Considérons les différentes variantes de l'Opéra de Sydney proposées par l'architecte danois Jørn Utzon et Ove Arup and Partners entre 1957 et 1963 (Fromonot, 1998). On ne dénombre pas moins de douze versions des coques. La différence entre ces versions tient au choix du profil des coques (Planche 1). Les premières coques dessinées à main levée (A) laissèrent place à un profil parabolique (B-C), puis circulaire (D-F). Celles-ci furent ensuite remplacées par des triangles ellipsoïdaux (G-J), puis par des triangles sphériques issus d'une même sphère théorique de 245 pieds de rayon (K-M). Ces opérations dépendent de l'échelle géométrique car elles visent à doter l'édifice de dimensions fondées sur un ordre géométrique. Utzon explique lui-même cette transformation : « On ne peut construire un tel complexe de formes sans clarté géométrique, sans avoir trouvé une sorte d'harmonie entre elles [...] J'ai finalement extrait ces formes d'une même sphère. Cela signifie que lorsqu'elles sont construites dans l'espace, leur intersection s'effectue selon des lois données » (1965 : 87). Il s'agit là d'un exemple caractéristique de transformation des mesures qui ne s'accompagne pas d'une altération du modèle morphologique. Du début à la fin du projet, les deux auditoriums ont toujours été couverts par quatre coques : trois emboîtées les unes aux autres ouvrant au Nord sur la baie de Sydney ; la quatrième, adossée aux précédentes, ouvrant sur la ville. Cette longue réflexion sur les coques de l'Opéra n'eut donc pas

d'influence sur la morphologie générale du bâtiment mais seulement sur les mesures du modèle architectural. On observera un fait analogue à travers les esquisses d'Alvar Aalto pour le projet de l'Hôtel de Ville de Göteborg (1955), où l'on constate que la morphologie de la Salle du Conseil s'est maintenue sans changement notable, du début à la fin du projet (Planche 2).

Imaginons maintenant que Jørn Utzon ne soit pas parvenu à tirer une solution élégante du système de coques de l'Opéra de Sydney, et qu'il ait entrepris d'en changer la disposition morphologique en les déboîtant les unes des autres. Il y a là une transformation, non seulement des mesures, mais du modèle morphologique de l'édifice. C'eût été également le cas, si Jørn Utzon avait abandonné le principe des coques pour concevoir un parallélépipède de type Boissevain-Osmond, 3e prix du concours de l'Opéra de Sydney. Et c'eût été encore le cas, si Alvar Aalto, en rupture avec les esquisses précédentes, avait choisi d'accoler la Salle du Conseil au bâtiment de l'hôtel de ville de Göteborg, plutôt que de la maintenir séparée.

Il convient par conséquent de distinguer deux cas : 1) le changement d'état résulte d'un ajustement des mesures qui n'altère pas le modèle morphologique (les projets de Utzon et de Aalto) ; 2) il résulte d'une transformation de la structure du modèle morphologique (les expériences de pensée sur les projets de Utzon et de Aalto). Précisons que cette distinction n'est pas contradictoire avec l'idée selon laquelle il n'y a pas de modèle sans échelle (Boudon, 1992 : 103). Il existe une dissymétrie évidente entre ces deux types de transformation : le changement des mesures peut ne pas altérer le modèle morphologique de l'édifice ; toute altération du modèle morphologique impose un changement corrélatif des mesures. Il est clair, par exemple, que l'abandon des coques de l'Opéra pour un parallélépipède Boissevain-Osmond aurait imposé à Utzon de reprendre à zéro une réflexion sur la pertinence des mesures.

III. LE SCHEME COMME OPERATEUR

Si l'échelle ne peut être tenue pour le seul opérateur de la conception architecturale, la voie est alors ouverte pour en découvrir de nouveaux. Ces opérateurs constituent probablement de multiples classes (opérateurs géométriques, opérateurs topologiques, etc.) Je ne m'intéresserai ici qu'à l'hypothèse selon laquelle des « schèmes d'action » peuvent décrire la transformation des modèles morpho-logiques. La notion de schème appartient à une

longue tradition philosophique et psychologique qu'il est impossible de retracer ici en détail (Kant, 1781² ; Revault d'Allonnes, 1921 ; Piaget, 1936 ; Cellier, 1979, etc.) Contentons-nous d'en rappeler les traits saillants, sous le point de vue qui nous occupe. Primo, à la suite de Revault d'Allonnes (1921), on peut maintenir la règle qui consiste à désigner le schème par un verbe d'action. Secundo, une liste des schèmes peut être construite à partir d'une analyse parasynonymique des verbes d'action. Le verbe d'action retenu pour qualifier le schème a alors le statut d'archilexème de la famille des parasynonymes (Raynaud, 1990 : 216-230). Par exemple, la famille : « jucher, grimper, hisser, hausser, monter, élever, ériger, etc. » est indicative d'un schème, que l'on peut désigner par le verbe le plus courant de toute la famille : monter. On parvient ainsi à ramener les quelques 8000 verbes usuels du français à une soixantaine de schèmes. Tertio, une analyse comparée appliquée à un échantillon de 162 bâtiments permet de reconnaître, parmi eux, une vingtaine de schèmes permettant de générer des formes architecturales. Ce sont, par fréquence décroissante : contenir, tourner, monter, rayonner, couvrir, passer, ouvrir, commencer, séparer, descendre, onduler, unir, clôturer, sortir, lier, répéter, finir, entourer, diminuer, croiser, battre, grandir, entrer (Raynaud, 1998)³. Voyons maintenant en quoi de tels schèmes constituent une nouvelle classe d'opérateurs de la conception architecturale.

III. 1. Une hypothèse de H.-A. Simon

La première occurrence de l'hypothèse du schème opérateur se trouve dans l'essai « Thinking by computers » (Simon [1966]) où l'on trouve les bases du General Problem Solver présenté ultérieurement par Newell et Simon (1972). L'auteur y soutient que l'analyse moyens-fins [means-end analysis] est une heuristique puissante de résolution de problème. Cette analyse suppose que :

1) La situation donnée est comparée avec la situation désirée de manière à mettre en évidence une ou plusieurs différences entre elles

² Kant, introducteur de la notion, en fait « un monogramme de l'imagination pure a priori au moyen duquel et suivant lequel les images sont tout d'abord possibles » (1781 : 153).

³ Pour une recension complète, voir Raynaud (1990 : 273-279). Des arguments ont été avancés (1990 : 231-252) pour décrire un schème à partir de quatre variables (nombre d'actants [N], proximité [P], dimension [D] et symétrie [S]), ce qui offrirait une solution alternative à la classique décomposition en primitives d'action.

(par exemple : j'ai une planche de 5 mètres de long ; je veux une planche de 3 mètres).

2) On recherche en mémoire un opérateur (ou des opérateurs) pouvant être associé à la différence détectée (par exemple : scier, raboter, percer). Ces opérateurs sont associés aux différences par le résultat d'expériences ayant montré que ces opérateurs sont capables de réduire ou d'annuler les différences en question (par exemple : scier change la longueur).

3) On essaie alors d'appliquer l'opérateur à la situation donnée. Parfois, on découvre que l'opérateur ne peut être appliqué sans que certains aspects de la situation ne soient à leur tour modifiés (par exemple : une planche doit être maintenue fermement pour être sciée). Dans ce cas, un nouveau but de type 1. est posé en vue de parvenir à la situation désirée (par exemple : maintenir la planche) (Simon, 1992 : 67).

Dans ce texte, Simon définit la notion d'opérateur d'une façon très large : « Par opérateur, j'entends quelque processus qui changera la situation présente » (1992 : 67), et on a souvent retenu — à juste titre — le caractère général de cette définition. On peut aller plus loin, et se demander si l'exemple donné par l'auteur ne sert pas directement la connaissance des opérations de conception architecturale. Simon indique spontanément des opérateurs comme scier, raboter, percer... qui sont des verbes d'action suffisamment généraux pour intégrer la classe des schèmes. Par ailleurs, l'idée selon laquelle l'opérateur transforme un modèle-source en modèle-but est — à une différence terminologique près — équivalente à l'idée selon laquelle l'opérateur change la situation donnée en situation désirée. La seule différence notable entre les schèmes et les opérateurs de Simon est que les seconds opèrent sur le monde physique, alors que les premiers opèrent dans le cadre virtuel de la conception. Mais, en regard de cette différence, qui n'est d'ailleurs pas insurmontable⁴, les similitudes sont frappantes. L'exemple du

⁴ Il existe de nombreuses données expérimentales créditant la thèse d'un isomorphisme structural entre les représentations et les événements perceptifs à partir desquels elles se constituent. Citons pour mémoire les expériences de « rotation mentale » effectuées par Shepard et Metzler (1971), Shepard et Cooper (1982), dans lesquelles on demande au sujet de juger si deux objets présentés sous des perspectives différentes sont identiques ou non. La fonction linéaire existant entre le temps de décision et la différence angulaire de présentation des objets suggère que les sujets effectuent une rotation mentale isomorphe à la rotation qui serait appliquée aux objets réels. On peut considérer que la représentation offre au concepteur la possibilité d'effectuer des « manipulations symboliques fonction-

menuisier de Simon incite en tout cas à examiner sérieusement l'hypothèse du schème opérateur, lequel exprimerait la transformation d'un modèle-source en modèle-but :

$$S_i(m) = m'$$

Cette écriture est formellement analogue à celle qui peut être appliquée à l'échelle. Il reste maintenant à évaluer si cette écriture est vide de sens ou si elle est à même de qualifier des faits réels de conception. Les premiers arguments sont fournis par des exemples de conception tirés de l'histoire de l'architecture. Trois projets, de Philibert de l'Orme (ca. 1648), de Ludwig Mies van der Rohe (1929) et de Norman Foster (1981), seront analysés à la suite.

nellement analogues à des manipulations réelles et qui fournissent au sujet des équivalents symboliques des états physiques résultant de manipulations effectives » (Denis, 1989 : 226). Il n'y a pas lieu d'opposer les actions réelles du menuisier de Simon aux actions virtuelles de l'architecte.

III. 2. Lier, par Philibert de l'Orme

*Je choisis sciemment un premier exemple dans l'histoire ancienne de l'architecture, pour suggérer que l'hypothèse du schème permet de rendre compte des opérations de conception, indépendamment de la situation historique et des conditions d'exercice particulières de la profession d'architecte. Prenons ici le Traité d'architecture de Philibert de l'Orme (1648). Il y parle en plusieurs endroits (livres X et XI) d'une invention que l'on peut nommer, avec une certaine neutralité : « charpente composée », mais en laquelle nous sommes en droit de reconnaître l'ancêtre du « lamellé-collé ». La charpente composée résulte d'une transformation du modèle de la charpente classique : « Je veux donc montrer comme se fera une poutre de plusieurs pièces toute droicte, et d'égale longueur que vous voudrez, et pourrez avoir affaire » (Traité d'architecture, XI, 8, 319 a). Il s'agit d'assembler plusieurs pièces courtes (ais) par des chevilles de manière à recomposer un poutre de longueur normale, l'assemblage de pièces moisées les unes sur les autres remplaçant la poutre d'un seul tenant. La recombinaison du modèle-but (pièce de charpente classique) peut alors être décrite par l'opérateur *lier* :*

Lier (ais, chevilles) = poutre

Cette écriture exige de préciser en quoi l'opération qu'elle symbolise possède une pertinence architecturologique. L'architecte de la Renaissance française donne lui-même les raisons qui ont déterminé la transformation du modèle classique : « Ainsi les ais sont assemblez les uns contre les autres, une pièce n'aura que deux pieds et l'autre quatre. Par ce moyen les commissures iront en liaisons : et se trouveront l'une contre l'autre, comme il faut qu'elles soient pour faire mieux ligature : et aussi pour avoir meilleur moyen de les oster, et remettre autres pièces, quand l'on voudra » (Traité d'architecture, X, 5, 284 a). Le premier intérêt de la charpente composée est que les pièces de bois usées peuvent être aisément remplacées. Ce dispositif répond tout d'abord à une pertinence technique. Mais Philibert de l'Orme insiste aussi, au livre XI, sur une raison plus fondamentale qui doit nous faire préférer le modèle de la charpente composée au modèle classique : « Qu'on regarde seulement combien coustent les cintres à porter les arcs de maçonnerie que l'on fait pour les ponts... Laquelle chose on pourra éviter par ceste Invention et faire autrement, sans oster le cours de l'eau, et n'usant de si grandes ames de long et gros bois... Bref, icy

ne se perd aucun bois, comme il se fait aux autres charpenteries, pour les grandes mortaises et entail qu'on a accoustumé d'y faire » (Traité d'architecture, XI, 14, 326 b-327 a). Ce passage est orienté selon un point de vue différent : il s'agit pour l'architecte de veiller à la dépense. La charpente composée relève également d'une pertinence économique.

Il faut maintenant se demander si cette opération de conception ne pouvait pas être décrite par le jeu d'échelles architecturologiques (auquel cas l'opérateur schème serait inutile). L'expérience suivante montre que la réponse est négative. Supposons que la charpente composée de Philibert de l'Orme doive s'appliquer à la reconstitution d'une ferme simple, dont l'entrait mesure 1000 cm, le poinçon 200 et l'arbalétrier 538. En supposant que l'architecte ait eu une réflexion sur l'échelle économique, il aurait pu tout aussi bien modifier la distribution interne de manière à réduire de moitié la largeur du bâtiment. Dans ce cas, la longueur des pièces de charpente aurait été réduite de moitié, rendant inutile l'assemblage des pièces de charpente. Cette solution répond à la même pertinence économique (elle rend inutile les longues pièces), mais elle se présente comme une solution alternative à celle qui fut imaginée par l'architecte. L'échelle seule ne peut donc pas exprimer le choix, qui fut fait par Philibert de l'Orme, de transformer le modèle morphologique. Cet exemple, tiré de l'architecture de la Renaissance française, ne mérite pas d'être approfondi, car le contexte de conception de la charpente composée est mal connu et les documents trop rares pour construire une analyse précise de cette découverte. Mais l'intérêt de cet exemple est qu'il suffit à indiquer le canevas d'une analyse des opérations de conception : 1) identification du schème ; 2) identification des pertinences auxquelles répond le schème ; 3) examen de la réductibilité de cette description à l'échelle. Nous l'appliquerons maintenant à des exemples plus récents et mieux documentés.

III. 2. Séparer, par Mies van der Rohe

Le nom de Mies van der Rohe (1886-1969), architecte allemand émigré aux États-Unis en 1938, reste attaché à la conception du « plan libre », qui libère les murs de leur fonction porteuse, et les transforme en simples écrans. Mies van der Rohe semble avoir découvert cette structure à l'occasion du projet du pavillon allemand pour l'exposition universelle de Barcelone (1929). L'architecte raconte en ces termes l'histoire de cette découverte : « Un soir,

comme je travaillais encore dessus [le Pavillon], je me suis mis à esquisser un mur auto-portant, et j'eus un choc. Je venais de trouver un principe nouveau [...]» (Mies, 1952 : 28). En recourant au système du « plan libre », il transforme le modèle classique du mur qui devait jusqu'à lors supporter les charges de la toiture. Cette transformation peut être décrite par une opération exprimant le passage du modèle-source au modèle-but. La conception classique du mur porteur signifie que le mur est à la fois : (1) un élément structurel (qui supporte les charges de la toiture et/ou des étages supérieurs) et (2) un élément de séparation spatiale (qui isole un espace d'un autre). Le système du « plan libre » consiste au contraire à traduire, tant du point de vue spatial que constructif, cette distinction des fonctions du mur porteur. Stricto sensu, on doit réserver les termes d'« écran » ou de « paroi » à ces murs qui ne portent qu'eux-mêmes, de manière à éviter toute confusion avec l'idée classique du mur ; de même qu'il vaut mieux parler de « poteau » ou de « support vertical » de manière à ne pas induire de rapport illusoire avec la colonne. Au Pavillon de Barcelone, la fonction structurelle sera assumée par huit poteaux cruciformes en acier inoxydable ; la fonction de séparation spatiale sera prise en charge par des parois d'onyx librement disposées dans l'espace⁵. Cette découverte doit être située entre le plan I et le plan II, datés tous deux de l'année 1928 (Planche 3, B et C). En effet, les huit poteaux cruciformes n'apparaissent que sur le second document. Le passage du modèle-source au modèle-but peut être décrit par l'opérateur séparer :

Séparer (mur porteur) = écran, poteau

⁵ Remarquons que cette découverte fut préparée par des projets antérieurs. Le texte qui accompagne le projet du Bâtiment administratif en béton de 1922, publié dans le tout premier numéro de G [Material zur elementaren Gestaltung], précise : « Les matériaux : béton, acier, verre. Les structures de béton armé sont des squelettes par nature... Les poteaux et les poutres éliminent les murs porteurs. Cette construction se compose d'une ossature et d'une peau » (Mies in Zukowsky, ed., 1987 : 44). Les mêmes formules préparatoires apparaissent dans l'Immeuble d'habitation du Weissenhof (1926), qui recourt à une structure d'acier indépendante. L'architecte dit : « La construction à ossature est, à cet égard, le système de construction le mieux adapté. Il peut être produit de manière rationnelle et laisse toute liberté pour la division des espaces intérieurs [Der Skelettbau ist hierzu das geeingneteste Konstruktionssystem. Er ermöglicht eine rationelle Herstellung und lässt der inneren Raumaufteilung jede Freiheit] » (Mies in Zukowsky, ed., 1987 : 65). Il est possible — mais non établi — que Lilly Reich, la collaboratrice de Mies entre 1926 et 1938, ait accentué cette réflexion de l'architecte allemand sur l'atectonisme. Elle avait en effet été l'élève de Josef Hoffmann au Wiener Werkstätte en 1902.

L'opération symbolisée par cette écriture possède-t-elle une pertinence architecturologique ? Le nom de « plan libre » donne une première indication : une structure porteuse indépendante permet d'ajuster la position des écrans avec beaucoup plus de précision quant à la destination des espaces (car l'« écran », au sens strict, n'a plus aucun rôle technique). On reconnaît ici une pertinence fonctionnelle, définie par le fait de déterminer l'espace architectural en fonction de la destination, de l'utilisation, ou de l'usage. Dans d'autres projets, comme celui de la maison Tugendhat à Brno (1930), Mies van der Rohe sépare à nouveau poteaux et écrans, mais explore des variantes, non pas dans l'ordre de la forme, puisque ce sont les mêmes poteaux cruciformes d'acier inoxydable, mais dans l'ordre de la conception. Jean-Louis Cohen a bien vu que « le jeu des cloisons et des façades avec les supports verticaux est plus difficile et plus complexe qu'à Barcelone » (1994 : 62). On remarque notamment que les poteaux du pignon Est de la villa sont en retrait de la paroi de verre d'une vingtaine de centimètres. Ces poteaux occultent les huisseries de la baie, placées dans l'axe des poteaux. Solution élégante, car si l'architecte avait placé ces poteaux dans le plan de la baie, il aurait fallu fixer les huisseries sur les ailes du poteau, ce qui aurait diminué d'autant le champ de vision. Le schème consistant à dissocier écrans et poteaux s'accompagne donc, à la maison Tugendhat, d'une réflexion inédite sur la pertinence optique et la pertinence de visibilité du dispositif (montrer le paysage plutôt que les huisseries ; ajuster la position des poteaux cruciformes en fonction d'un point de vue). Le schème consistant à séparer poteaux et écrans répond ainsi à plusieurs pertinences : fonctionnelle, optique, de visibilité.

Il reste à déterminer si le schème est nécessaire pour décrire cette opération de conception. On peut entrevoir la réponse à partir d'une observation simple. En supposant que Mies ait eu la même réflexion sur l'échelle fonctionnelle qu'au Pavillon de Barcelone, il aurait pu tout aussi bien choisir de ne pas séparer les poteaux et les écrans, en adaptant librement les pièces à leur usage, et en franchissant la distance entre les murs porteurs par des poutres de portée variable (tactique de conception très courante chez les architectes). De même, à la maison Tugendhat, l'échelle de visibilité aurait pu conduire Mies, non pas à séparer le poteau cruciforme des huisseries, mais au contraire à coller celles-ci contre les ailes extérieures du poteau. Cette opération ne peut donc pas être retraduite en termes d'échelle. L'échelle nous apprend ici comment, et en fonction de quoi,

l'architecte donne des mesures, non pas comment il transforme le modèle morphologique. Le schème séparer est d'ailleurs à ce point caractéristique des projets de Mies que certains historiens en ont fait la base à partir de laquelle sont décrits ses projets des années 1930. Frampton, par exemple, résout ces édifices en une suite d'antinomies : « piliers en opposition à surfaces planes, tectonique en opposition à atectonique, opaque en opposition à translucide, tranquillité opposée à agitation, ouvert opposé à fermé et, même, architecture en opposition à construction » (in Zukowsky, 1987 : 47).

III. 3. Sortir, par Norman Foster

Le projet de la Hongkong Banking Corporation, dont le chantier s'est achevé en 1986, est une des œuvres les plus connues de l'architecte britannique Norman Foster. Il constitue l'un des points de repère de l'architecture high tech. La conception de ce projet a duré de 1979 à 1981. Les hypothèses successivement envisagées pour ce bâtiment sont au nombre de quatre. Dans la proposition initiale de novembre 1979, les concepteurs ont retenu l'idée de quatre travées reliées par des piles en béton en H dans lesquelles venaient se loger les services (Planche 4, A). Cette version fut abandonnée en mai 1980 pour la version connue sous le nom de « chevrons ». Dans cette hypothèse, comparable au système des ponts suspendus, les plateaux des différents étages étaient maintenus par des câbles partant des piles d'acier latérales. Ce projet fut lui aussi rejeté en raison de l'image des chevrons pointant vers le bas, laquelle parut incompatible avec les règles du Feng shui, aux yeux des responsables de la banque. En juillet 1980, l'équipe d'architectes conçut un nouveau projet, dit « tuyaux d'orgue ». Comme l'écrit l'architecte, cette solution « [...] fut à l'origine de l'effet des tours élancées sur la façade Est » (Foster, 1989 : 33). Enfin, le dernier projet, élaboré à partir d'août 1980, fut définitivement approuvé par le conseil d'administration en janvier 1981. Chacune de ces quatre versions porte la trace de la fameuse distinction inaugurée par Louis I. Kahn entre « espace servant » et « espace servi ». Dès le départ, les plateaux de bureaux [served area] furent encadrés, à l'Est et à l'Ouest, par deux « murs de mouvement » où venaient se loger tous les services [servant area]. Les ascenseurs, les escaliers, les toilettes, et les gaines techniques étaient en contact avec l'enveloppe du bâtiment. Si l'on se concentre maintenant sur la position des escaliers de secours de la façade Est, on constatera que ceux-ci ont effectué une migration tout au long du projet. Dans la première

proposition, ils sont en retrait des plateformes (Planche 4, B et C). Dans la version « chevrons », ils sont au niveau des éléments structurels, avec quelque flottement quant à leur position exacte : un croquis les montre à demi enchâssés dans le plateau (Planche 4, D), alors que, sur le plan à l'échelle, les espaces servants sont des cellules autonomes rapportées sur la peau du bâtiment (Planche 4, E) que les concepteurs ont appelées des « cocons » ou des « gousses » [pods] (Foster, 1989 : 136). Enfin, à partir de la version « tuyau d'orgues », les escaliers seront en saillie des plateaux et ce trait sera davantage accentué dans la version définitive (Planche 4, F et G). La migration⁶ des escaliers de secours de l'intérieur vers l'extérieur de l'enveloppe peut être décrite par l'opérateur sortir :

Sortir (escalier, façade) = escalier extérieur

Il convient maintenant de rechercher les pertinences architecturologiques de cette opération. La première raison expliquant le rejet des escaliers en façade réside dans l'objectif de flexibilité des plateaux (Foster, 1989 : 204). L'architecte témoigne que le positionnement de tous les espaces servants sur les façades Est et Ouest « laisse une vaste étendue d'espace de travail ininterrompue » et que « les tours structurelles de chaque côté du bâtiment furent vues comme contenant aussi les services du bâtiment, laissant le plancher des larges travées libre de toute obstruction » (Foster, 1989 : 136). Cette pertinence fonctionnelle est complétée par deux autres déterminations. En premier lieu, depuis le début du projet, les architectes réfléchissaient à une façade offrant de forts contrastes d'ombre et de lumière (Planche 4, B). L'hypothèse des « tuyaux d'orgue » est, à cet égard, qualifiée par l'un des collaborateurs — Tony Fitzpatrick — d'« exercice pour régler le problème de l'ombre » (in Foster, 1989 : 33). Le déboîtement des escaliers de secours répond on ne peut plus clairement à cette volonté. La pertinence du point de vue de la visibilité s'accompagne enfin d'une

⁶ Il n'est pas inutile d'ajouter deux remarques historiques à cette analyse. La première est que l'idée de la Hongkong Bank s'inspire assez directement de la conception des Richards Medical Research Laboratories par Louis I. Kahn, qui offrent une façade assez proche d'un croquis de la main de Norman Foster (Planche 4, B). La deuxième est que l'agence Foster a conçu à la même époque plusieurs bâtiments ayant le même principe de distribution. Dans le Billingsgate Market de Londres (1981), on trouve un cas de figure similaire au projet initial de la banque (Planche 4, C). Le projet de la Humana Competition de Louisville (1982) se rapproche quant à lui de la solution définitive adoptée pour la banque (Planche 4, G). Une tour cylindrique [served area] y est en effet flanquée de deux blocs de services [servant area] (Foster, 1989 : 81).

prise en compte des solutions constructives. Les piles de béton ou d'acier des premières versions ont été remplacées par des « mâts structurels » consistant en un faisceau de quatre éléments verticaux reliés entre eux, et repérables en plan par quatre plots ronds (Planche 4, G). De manière à ne pas occasionner de chevauchement entre les croix de Saint-André, assurant le contreventement des mâts, et les espaces servants, deux solutions étaient envisageables : ou bien rentrer les services en deçà des mâts structurels ; ou bien les repousser au-delà des mâts structurels. La seconde hypothèse, s'accordant mieux avec l'idée de flexibilité des plateaux et le parti des ombres marquées, fut adoptée. Elle n'en accentue que davantage la saillie des escaliers de secours sur la façade (Planche 4, G). Dans le projet de la Hongkong Bank de Foster, le schème sortir répond ainsi à trois pertinences : fonctionnelle, technique et de visibilité.

Demandons-nous toutefois si le schème est nécessaire pour conduire cette analyse. Comme dans le projet de Mies examiné plus haut, celui-ci semble constituer une donnée de l'évolution projet intraduisible en termes d'échelle. En effet, la prise en compte de l'échelle de visibilité aurait pu tout aussi bien conduire les architectes de l'agence Foster and Partners à retenir une tout autre hypothèse, consistant à rentrer les escaliers au nu de la façade, et à disposer ensuite des brise-soleil sur la façade de manière à obtenir les effets d'ombre et de lumière escomptés. L'échelle exprime donc adéquatement certaines transformations, mais elle n'est pas en mesure de décrire les transformations qui affectent le modèle morphologique.

IV. CONCLUSIONS

En dépit des limites inhérentes à toute reconstruction ex post facto des opérations de conception à partir de séries chronologiques d'esquisses, l'étude des projets d'architecture montre la distinction proposée en II.2 est valide :

1) Il est des cas où le modèle morphologique n'est pas transformé au cours du processus de conception. Les opérations de conception concernent alors la mesure (projets de Jørn Utzon et de Alvar Aalto), et peuvent être interprétées dans le cadre classique de l'architecture.

2) Il est des cas où le modèle morphologique fait l'objet d'une transformation autre qu'un ajustement dimensionnel (projets de Philibert de l'Orme, de Ludwig Mies van der Rohe et de Norman

Foster). Les changements d'état doivent alors être décrits à partir d'autres opérateurs de la conception architecturale : les schèmes.

Observons qu'il est hautement improbable que les trois schèmes d'action mis en évidence ici (lier, séparer, sortir) soient les seuls qui puissent rendre compte d'une opération sur les modèles. Les documents historiques fournissent en effet immédiatement d'autres exemples. Citons le cas de deux architectes suisses, Herzog et de Meuron. Ils ont récemment conçu une maison sur un terrain exigu dont le centre était occupé par un très vieux Paulownia. Voulant conserver l'arbre, ils ont alors déformé la façade de manière à éviter le tronc de l'arbre, en fonction d'une pertinence parcellaire. Cette liste pourrait être étendue, à tel point qu'il est plus raisonnable d'admettre que la liste de ces opérateurs se confond avec la liste des schèmes que l'on tire d'une analyse parasynonymique des verbes d'actions (cf. supra III).

Les projets examinés dans cet article suggèrent que les architectes recourent régulièrement à des opérations de conception affectant le modèle morphologique de l'édifice. Ces opérations paraissent avoir un caractère régulier et général, ce que souligne l'écriture :

$$S_i(m) = m'$$

Ce symbolisme ne manque pas de poser en retour certaines questions sur la modélisation des opérations de conception. Nous avons admis, en début d'article, la position selon laquelle les échelles sont des opérateurs de la conception (Boudon, 1992 : 179-180, Boudon et al., 1994 : 131). Nous avons ensuite avancé l'idée que les schèmes constituent une deuxième classe d'opérateurs. Le recours à la notion d'opérateur, pour exprimer des changements d'états dans l'ordre de la conception, soulève des problèmes qui méritent d'être examinés.

Une première question se pose quant à l'usage du mot opération. Recourir à cette notion signifie ipso facto, dans les sciences dures, que l'on est en mesure de déterminer le résultat de l'opération. Une équation du type : $x = 2 + 2$ répond évidemment à cette condition. Dans la conception architecturale, l'usage d'opérations signifie que la connaissance du modèle-source, de l'opérateur et des pertinences, doit permettre la reconstruction du modèle-but. L'architecturologie s'écarte de cette voie. Elle préfère introduire un assouplissement des notions d'opération, d'opérateur et d'opérande de manière à ne pas s'interroger sur la déterminabilité du modèle-but. On peut avancer

une autre réponse, qui se fonde sur le fait, admis par certains, que la conception est un espace d'actions finalisées. Observation préliminaire : le but, avant d'être confondu avec le résultat, doit être pris pour ce qu'il est : une représentation mentale antérieure à l'action. Le but ne s'identifie donc pas au résultat, mais il faut admettre qu'un concepteur ayant un minimum d'expérience entrevoit, au travers du but, le résultat de l'opération qu'il va entreprendre. But et résultat doivent être concordants, au moins d'une façon « satisfaisante » au sens de Herbert A. Simon (1982). Supposer le contraire reviendrait en effet à affirmer que le menuisier qui rabote, le chirurgien qui opère ou l'architecte qui conçoit, agissent au hasard dans le cadre d'actions non-finalisées. La question se poserait alors de savoir pourquoi ils agissent, s'ils savent ne pas pouvoir atteindre un but. Que la conception architecturale soit une situation de résolution de problèmes mal définis à solutions sous-optimales, introduit une distance entre le but et le résultat, mais n'annule pas l'idée que la conception est un espace d'actions finalisées. Cet argument plaide pour que l'on continue à parler d'opérations de conception.

La deuxième difficulté réside dans le sens que l'on prête au mot détermination du résultat, dans le cadre de ces opérations. Si l'on entend cette détermination stricto sensu, celle qui impose une connaissance totale du résultat, il est clair que les opérations relatives à l'échelle et au schème ne sont pas des opérations de ce type. Mais si l'on entend le mot au sens de détermination sous un point de vue donné, l'obstacle est levé.

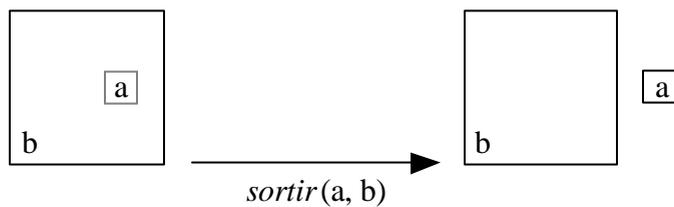
Primo, il convient sans doute de reconnaître qu'une détermination totale est une utopie. Si les opérations mathématiques donnent un tel sentiment de détermination du résultat, c'est parce que le point de vue mathématique est unimodal : il établit une démarcation claire entre ce qui doit être déterminé et ce qui est soustrait à la détermination. Ainsi, le mathématicien résolvant une équation ne prête guère attention à la forme des caractères, à la couleur de l'encre qu'il utilise ou aux objets référents du monde réel auxquels pourrait s'appliquer son équation. Chacun peut ainsi faire le développement $(a+b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$, sans penser une seconde qu'il pourrait servir à calculer l'augmentation de surface d'un carré. Le fait que a et b puisse représenter des quantités mesurables en mètres est tout simplement indifférent au point de vue mathématique.

Secundo, il faut examiner comment s'applique cette idée de détermination sous un point de vue donné à la conception

architecturale. Au contraire du mathématicien, dont le point de vue fait l'objet d'une démarcation claire, l'architecte est tenu de spécifier l'objet architectural par référence à plusieurs points de vue. Il doit non seulement donner des formes et des mesures à l'édifice, mais choisir des matériaux ayant une certaine texture, une certaine couleur, etc. La résolution des problèmes de conception architecturale est donc multimodale. Mais cette caractéristique n'interdit pas de parler de détermination du résultat, pour autant que le point de vue est clairement spécifié. Retranscrivons à cet effet le schème imaginé par Norman Foster :

Sortir_{fonctionnel.technique.visibilité}(escalier, immeuble) = escalier extérieur

Pour plus de clarté, ce schème peut être associé à la représentation suivante :



On doit admettre que l'architecte qui fait migrer les escaliers au-delà de la peau du bâtiment sait, par anticipation, qu'ils se retrouveront à l'extérieur du bâtiment. De même, si l'on reprend l'exemple du Pavillon de Mies, celui qui dissocie porteurs et écrans sait, par anticipation, qu'ils seront désormais séparés. Le point de vue étant spécifié — c'est ici celui des changements morphologiques, et non pas ceux qui pourraient apparaître dans l'ordre de la géométrie, des mesures, des matériaux, etc. — le modèle-but est connaissable à partir du modèle-source et de l'opérateur. Le modèle-but est donc déterminé, sous le point de vue spécifié. L'objet de la détermination est ici la position approchée ou le sens de variation⁷.

⁷ Cela ne suppose pas un assouplissement du mot détermination. Si l'on considère, relativement au schème sortir, un domaine de position autour de l'enveloppe de l'objet b, on peut mesurer la position p de a sur un axe perpendiculaire à la surface de b. Fixons une origine (la limite intérieur-extérieur) et un sens (valeurs négatives à l'intérieur). Il est alors possible de définir la fonction : $f(p < 0) = -1$, $f(p = 0) = 0$, $f(p > 0) = +1$. La position approchée de a aura pour valeur +1 (celle de l'opération entrer a pour valeur -1). D'autres possibilités existent pour fonder une caractérisation plus générale du schème.

Une articulation du modèle architecturologique avec ces réflexions est dès lors envisageable. Car, s'il est vrai qu'il peut y avoir changement des mesures sans changement de modèle morphologique, l'inverse est faux. Il ne peut y avoir de changement de modèle morphologique sans un changement corrélatif des mesures. Et c'est pourquoi la description précédente appelle une description concomitante du changement de mesure. Le schème sortir (escaliers, immeuble) pose la question : « De combien doit-on sortir les escaliers ? », de même que le schème séparer (porteur, écran) demande : « De combien doit-on séparer le porteur et l'écran ? », questions auxquelles l'opérateur échelle est à même de répondre. Il revient à l'architecturologie d'interpréter ces phénomènes devant lesquels le modèle du schème est muet. Notons cependant que ces opérations sur les modèles morphologiques et sur les mesures ne peuvent être distinguées que dans l'ordre d'une analyse. Pour l'architecte en train de concevoir, il n'existe pas de distinction chronologique entre une phase d'opérations morphologiques et une phase d'attribution des mesures. Ces réflexions sont concomitantes. Elles ouvrent donc la perspective d'une articulation de l'échelle et du schème, dans l'ordre de la conception, si tant est que la différence de position sur la déterminabilité du résultat des opérations de conception soit réductible.

Bibliographie

- Alexander, C. (1964) De la synthèse de la forme, Paris, Dunod.
 Boudon, Ph. (1971) Sur l'espace architectural. Essai d'épistémologie, Paris, Dunod.
 Boudon, Ph. (1992) Introduction à l'architecturologie, Paris, Dunod.
 Boudon, Ph. (1994) Existe-t-il des opérations de conception architecturale ? in Prost R. (éd.) Conception, invention, création, Paris, L'Harmattan.
 Boudon, Ph. (1997) Sémiotique architecturologique et architecturologie expérimentale, fasc. 2, Rapport final quadriennal, Paris, LAREA.
 Boudon, Ph. et al (1994) Enseigner la conception architecturale. Cours d'architecturologie, Paris, Éditions de la Villette.

Considérons la plus petite enveloppe convexe contenant tous les objets sur lesquels porte l'opération. Entre l'état-source et l'état-but, l'opération affectera le volume de l'enveloppe : $E \otimes E'$. On peut à nouveau définir un domaine de variation et une fonction telle que $f(E' > E) = -1$ (le volume de l'enveloppe croît), $f(E' = E) = 0$ (il est identique), $f(E' < E) = +1$ (il décroît). Sous ces conditions, les schèmes sortir et séparer déterminent la valeur $f(E) = -1$. Ce raisonnement est à la base d'une classification en schèmes divergents, avergents et convergents (Raynaud, 1990 : 239-245 ; 1998 : 133-135, 138).

- Boudon, Ph. et Deshayes, Ph. (éds.) (1997) Les sciences de la conception sont-elles enseignables ? Dossier MCX 12, Aix-en-Provence, Association européenne du Programme Modélisation de la Complexité.
- Bundesen, C. et Larsen, A. (1975) Visual transformation of size, *J. of Experimental Psychology*, 1, pp. 214-220.
- Carroll, J.M., Thomas, J.C. et Malhotra, A. (1980) Presentation and representation in design problem-solving, *British Journal of Psychology*, 71, pp. 143-153.
- Cauzinille-Marmèche, E., Mathieu, J. et Weil-Barais, A. (1985) Raisonement analogique et résolution de problèmes, *Année psychologique*, 85, pp. 49-72.
- Cellerier, G. (1979) Structures cognitives et schèmes d'action, *Archives de psychologie*, 47, pp. 87-122.
- Chase, W.G. et Simon, H.A. (1973) *The mind's eye in chess*, in Chase W.G. (ed.) Visual information processing, New York, Academic Press.
- Chi, M.T., Feltovich, P.J. et Glaser, R. (1981) Categorization and representation of physics problems by experts and novice, *Cognitive Science*, 5, pp. 121-152.
- Cohen, J.L. (1994) Mies van der Rohe, Paris, Hazan.
- Conan, M. (1981) Les processus de conception architecturale, Paris, Plan Construction.
- Conan, M. (1990) Concevoir un projet d'architecture, Paris, L'Harmattan.
- Denis, M. (1989) Image et cognition, Paris, PUF.
- Denis, M. ed. (1997) Langage et cognition spatiale, Paris, Masson.
- Fleig, K. (1974) Alvar Aalto, Zürich, Éditions d'architecture Artémis.
- Foster, N. et al. (1989) Buildings and projects, vol. 3 (1978-1985), Hongkong, Watermark.
- Fromont, F. (1998) Jørn Utzon et l'Opéra de Sydney, Paris, Gallimard.
- Hall, W.B. et MacKinnon, D.W. (1969) Personality inventory correlates of creativity among architects, *Journal of Applied Psychology*, 53, pp. 322-326.
- Holyoak, K.J. (1995) Problem solving, in Smith E.E. et Osherson D.N. (eds.) An invitation to cognitive science, vol. 3: Thinking, Cambridge, The MIT Press, pp. 267-296.
- Huttenlocher, J. (1968) Constructing spatial images : A strategy in reasoning, *Psychological Review*, 75, pp. 550-560.
- Johnson-Laird, P.N. (1983) Mental models : Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness, Cambridge, Cambridge University Press.
- Kant, I. (1944) Critique de la raison pure, trad. A. Tremesaygues et B. Pacaud, Paris, PUF [1781].

- Kosslyn, S.M. (1980) *Image and mind*, Cambridge, The MIT Press.
- Kosslyn, S.M. (1995) *Mental imagery*, in Kosslyn S.M. et Osherson D.N. (eds.) *An invitation to cognitive science, vol. 2 : Visual cognition*, Cambridge, The MIT Press, pp. 267-296.
- Kosslyn, S.M., Ball, T.M. et Reiser, B.J. (1978) *Visual images preserve metric spatial information : Evidence from studies of image scanning*, *Journal of Experimental Psychology*, 4, pp. 47-60.
- Lebahar, J.C. (1983) *Le dessin d'architecte. Simulation graphique et réduction d'incertitude*, Marseille, Parenthèses.
- Le Moigne, J.L. (1995) *Les épistémologies constructivistes*, Paris, PUF.
- Leplat, J. (1985) *Les représentations fonctionnelles dans le travail*, *Psychologie française*, 30, 3-4, pp. 269-275.
- Mandler, J.M. (1984) *Stories, scripts and scenes : Aspects of schema theory*, Hillsdale, Lawrence Erlbaum.
- Metcalfe, J. et Wiebe, D. (1987) *Intuition in insight and noninsight problem solving*, *Memory and Cognition*, 15, pp. 238-246.
- Mies van des Rohe, L. (1952) *6 students talk with Mies*, North Carolina University State College, School of Design Student Publication, 2, s.p.
- Newell, A. et Simon, H.A. (1972) *Human problem solving*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- Newell, A. (1990) *Unified theories of cognition*, Cambridge, Harvard University Press.
- Orme, Ph. de l' (1981) *Traité d'architecture*, Bruxelles, P. Mardaga [1648].
- Piaget, J. (1936) *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*, Paris, Delachaux et Niestlé.
- Prost, R. (1992) *Conception architecturale : une investigation méthodologique*, Paris, L'Harmattan.
- Prost, R. (éd.) (1994) *Conception, invention, création*, Paris, L'Harmattan.
- Pylyshyn, Z.W. (1981) *The imagery debate : Analogue media versus tacit knowledge*, *Psychological Review*, 87, pp. 16-45.
- Raynaud, D. (1990) *L'imagination architecturale, vol. 1. Méthodologie et études, vol. 2. Essai de schématologie, thèse de doctorat*, Grenoble, Université Pierre-Mendès-France.
- Raynaud, D. (1992) *La conception architecturale : un processus séquentiel, analogique et sémantique*, Séminaire sur les processus de conception, Paris, Ministère de l'Équipement, vol. 3, pp. 224-250.
- Raynaud, D. (1998) *Architectures comparées. Essai sur la dynamique des formes*, Marseille, Parenthèses.
- Raynaud, D. (1998) *L'hypothèse d'Oxford. Essai sur les origines de la perspective*, Paris, PUF.

- Raynaud, D. (1999) *Forme urbaine*. Ph. Boudon, éd., Langages singuliers et partagés de l'urbain. Actes du Colloque CNRS UMR 7544, Paris, L'Harmattan, pp. 93-120.
- Revault d'Allonnes, M. (1921) *Les schèmes présentés par les sens*, Revue philosophique, 91, 2, pp. 316-343.
- Richard, J.F. (1998) Les activités mentales. Comprendre, raisonner, trouver des solutions, Paris, A. Colin.
- Schank, R.C. et Abelson, R.P. (1977) *Scripts, plans, goals and understanding*, Hillsdale, Lawrence Erlbaum.
- Schmeidler, G.R. (1965) *Visual imagery correlated to a measure of creativity*, Journal of Consultative Psychology, 29, pp. 169-181.
- Shepard, R.N. et Metzler, J. (1971) *Mental rotation of three-dimensional objects*, Science, 171, pp. 701-703.
- Shepard, R.N. et Cooper, L.A. (1982) *Mental images and their transformations*, Cambridge, The MIT Press.
- Simon, H.A. (1974) *Sciences des systèmes. Sciences de l'artificiel*, Paris, Epi [1963].
- Simon, H.A. et al. (1992) *Economics, bounded rationality and the cognitive revolution*, Brookfield, Ed. Elgar.
- Treiber, D. (1992) Norman Foster et la tour de la Hongkong Bank. Vers l'espace tertiaire du futur, Paris, Plan Construction et Architecture.
- Utzon, J. (1965) *The Sydney Opera House*, Zodiac, 14, p. 49.
- Vega, M. de, et Rodrigo, M.J. (1997) *Les représentations topologiques dans le traitement des descriptions spatiales*, in Denis M. (ed.) Langage et cognition spatiale, Paris, Masson, pp. 51-68.
- Volkema, R.J. (1988) *Problem complexity and the formulation process in planning and design*, Behavioral Science, 33, pp. 292-300.
- Williams, S. (1989) *Hongkong Bank. The building of Norman Foster's masterpiece*, London, Jonnathan Cape.
- Wittgenstein, L. (1961) *Tractatus logico-philosophicus. Investigations philosophiques*, Paris, Gallimard.
- Zukowsky, J. ed. (1987) *Mies van der Rohe. Sa carrière, son héritage, ses disciples*, Paris, Éditions du Centre Georges Pompidou.

ILLUSTRATIONS

(voir pages suivantes)

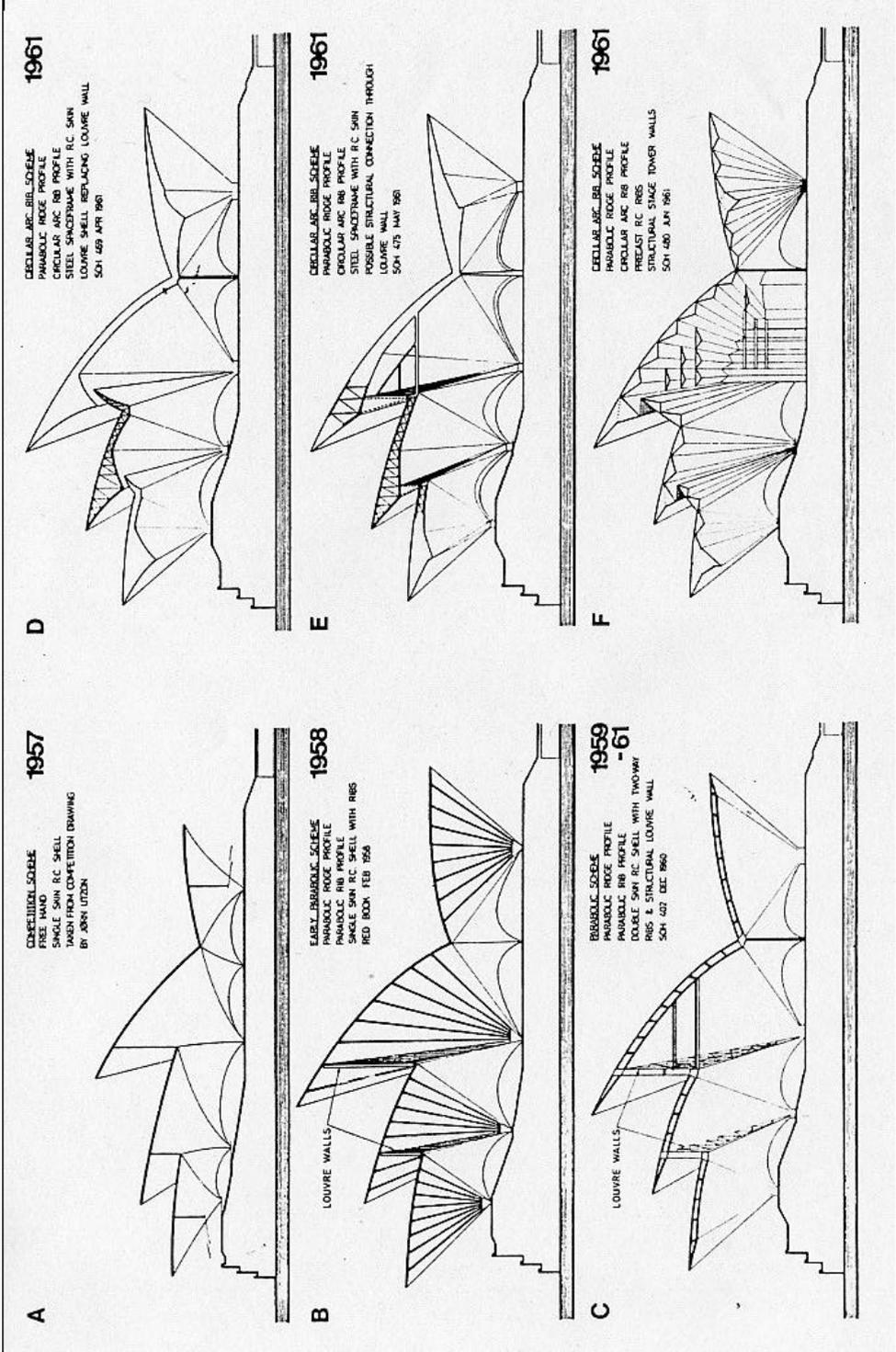
PLANCHE 1 : Jørn Utzon, Opera House, Sydney (1957-1963). Conservation du modèle à travers les variantes successives des coques. A : courbe à main levée. B, C : arêtes et nervures paraboliques. D, E, F : arêtes paraboliques et nervures circulaires. G, H, I : arêtes et nervures elliptiques. K, L, M : arêtes et nervures circulaires. D'après Fromonot (1998).

PLANCHE 2 : Alvar Aalto, Projet d'hôtel de ville, Göteborg (1955). Conservation du modèle à travers les différentes esquisses de la Salle du Conseil. A : Premier croquis. B : Esquisse. C : Croquis précisant le contenu et la disposition de la salle (sur la même feuille que B). D : Croquis de la salle figurant sur une esquisse du restaurant. E : Proposition pour la Salle du Conseil (plan et coupe). F : Plan d'avant-projet définitif. Dessins autographes, d'après Fleig (1974).

PLANCHE 3 : Mies van der Rohe, Pavillon allemand, Barcelone (1928-1929). Passage des murs aux écrans + poteaux. A : Croquis. B : Plan 1, crayon sur calque, 1928. C : Plan 2, crayon noir et crayons de couleur sur calque, 1928. D : Plan définitif du Pavillon allemand. Dessins autographes, Archives Mies van der Rohe, New York, Museum of Modern Art, d'après Zukowski (1987).

PLANCHE 4 : Norman Foster, Siège de la Hongkong Bank, Hongkong (1979-1981). Évolution des escaliers de secours à travers les différentes versions du projet. A : Proposition initiale, 1979. B : Jeux d'ombre sur la façade Est. C : Plan de la proposition initiale. D : Croquis de la solution

"chevrons", 1980. E: Plan de la solution "chevrons". F: Croquis de la proposition "tuyaux d'orgue", 1980. G: Plan courant du projet définitif, 1981. Archives Foster Associates, d'après Foster (1989).



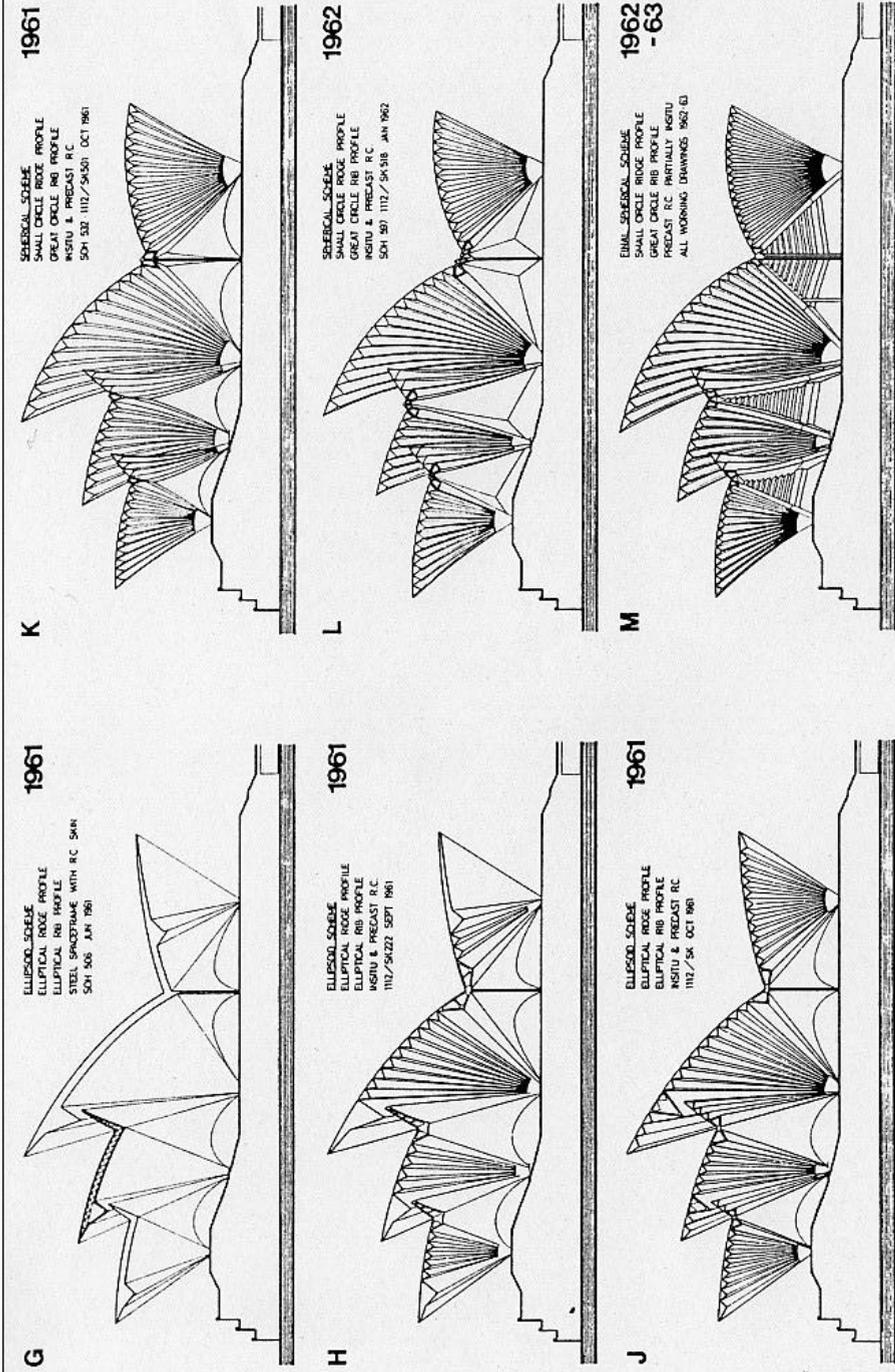
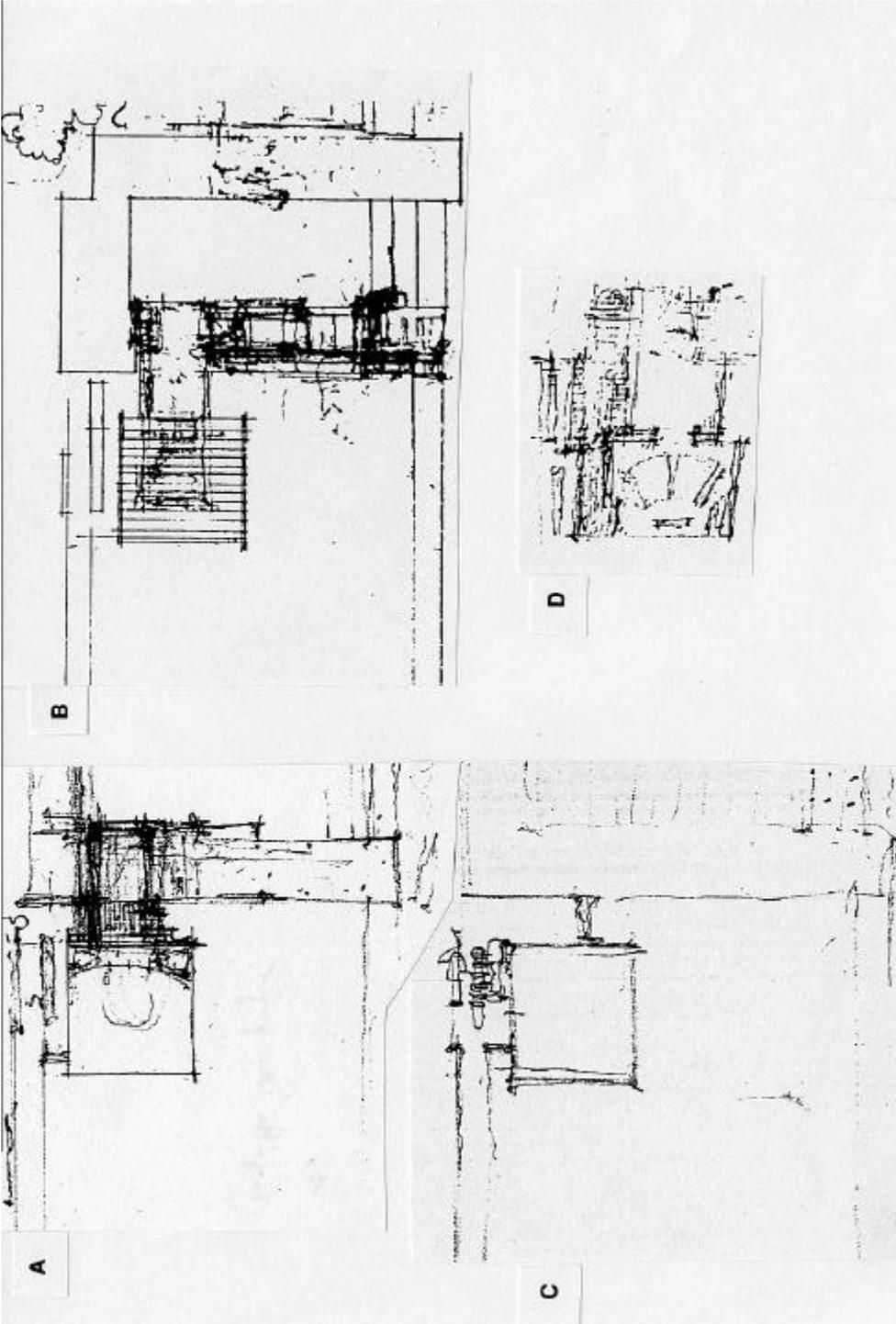
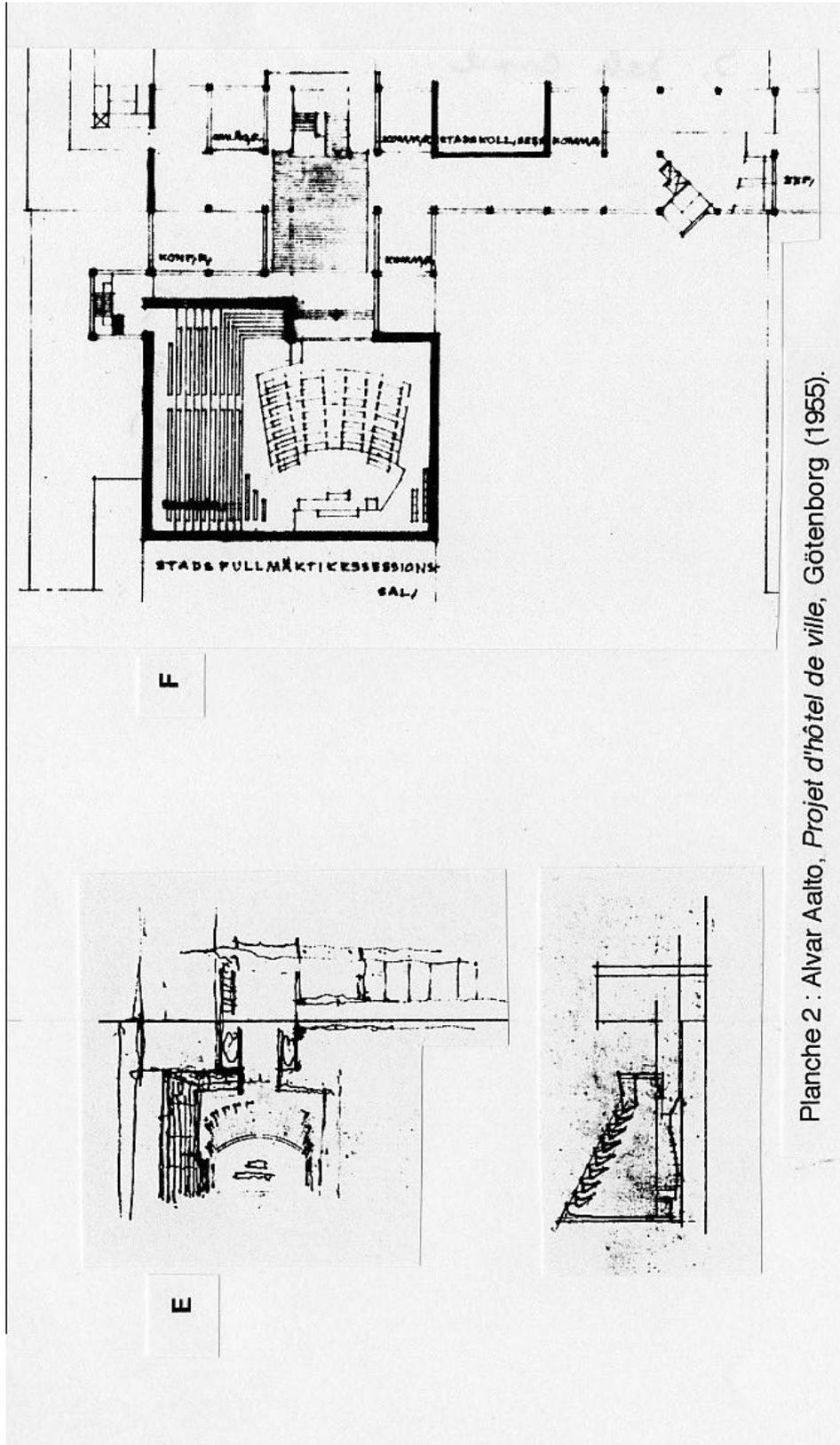
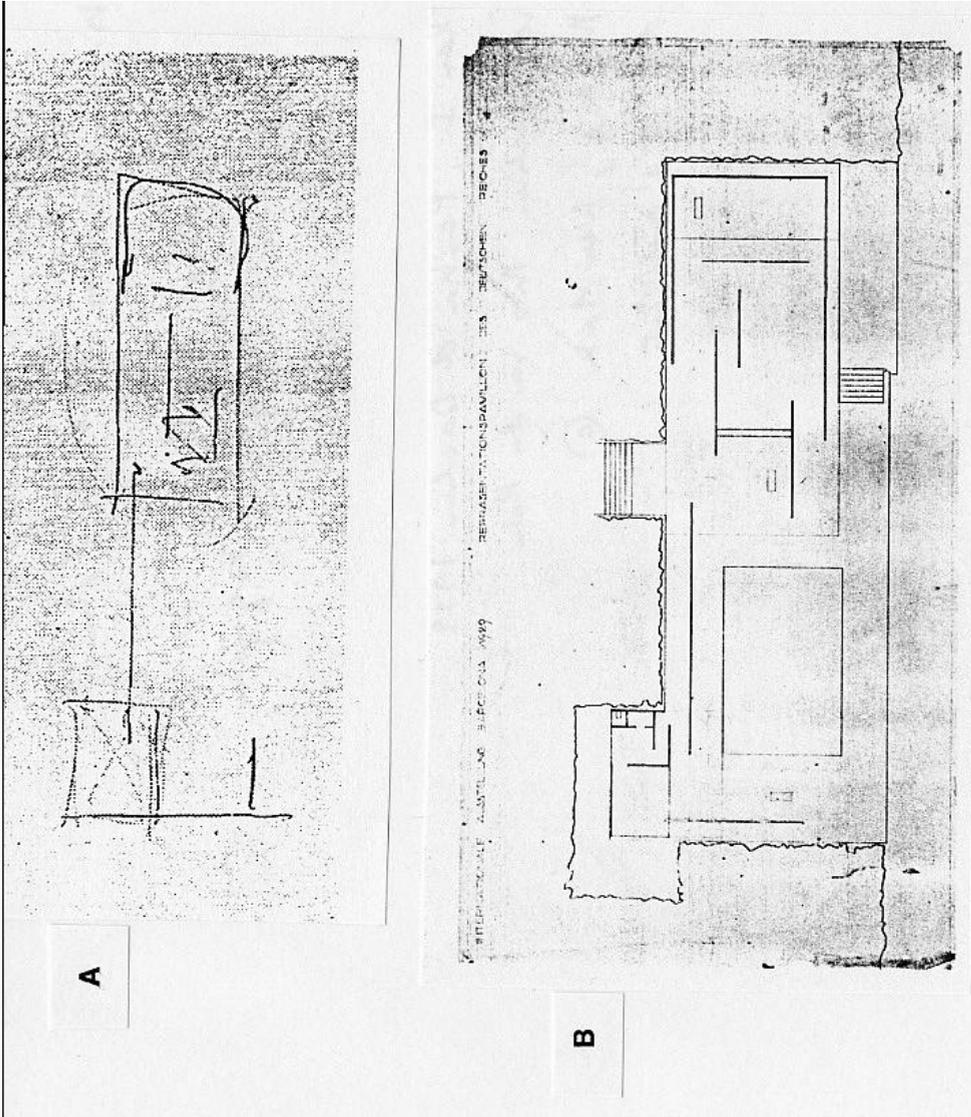


Planche 1 : Jørn Utzon, O'péra House, Sydney (1957-1963).







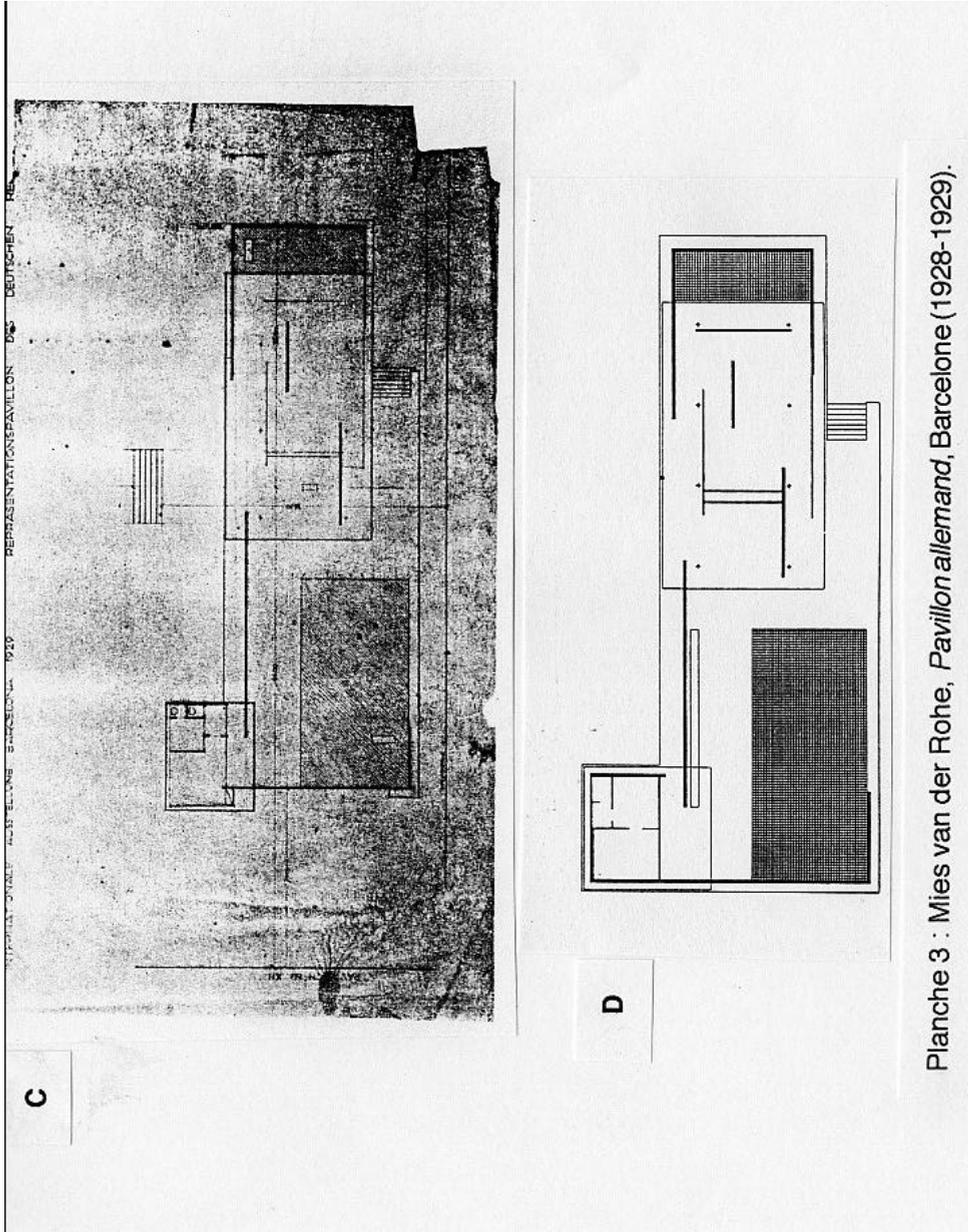
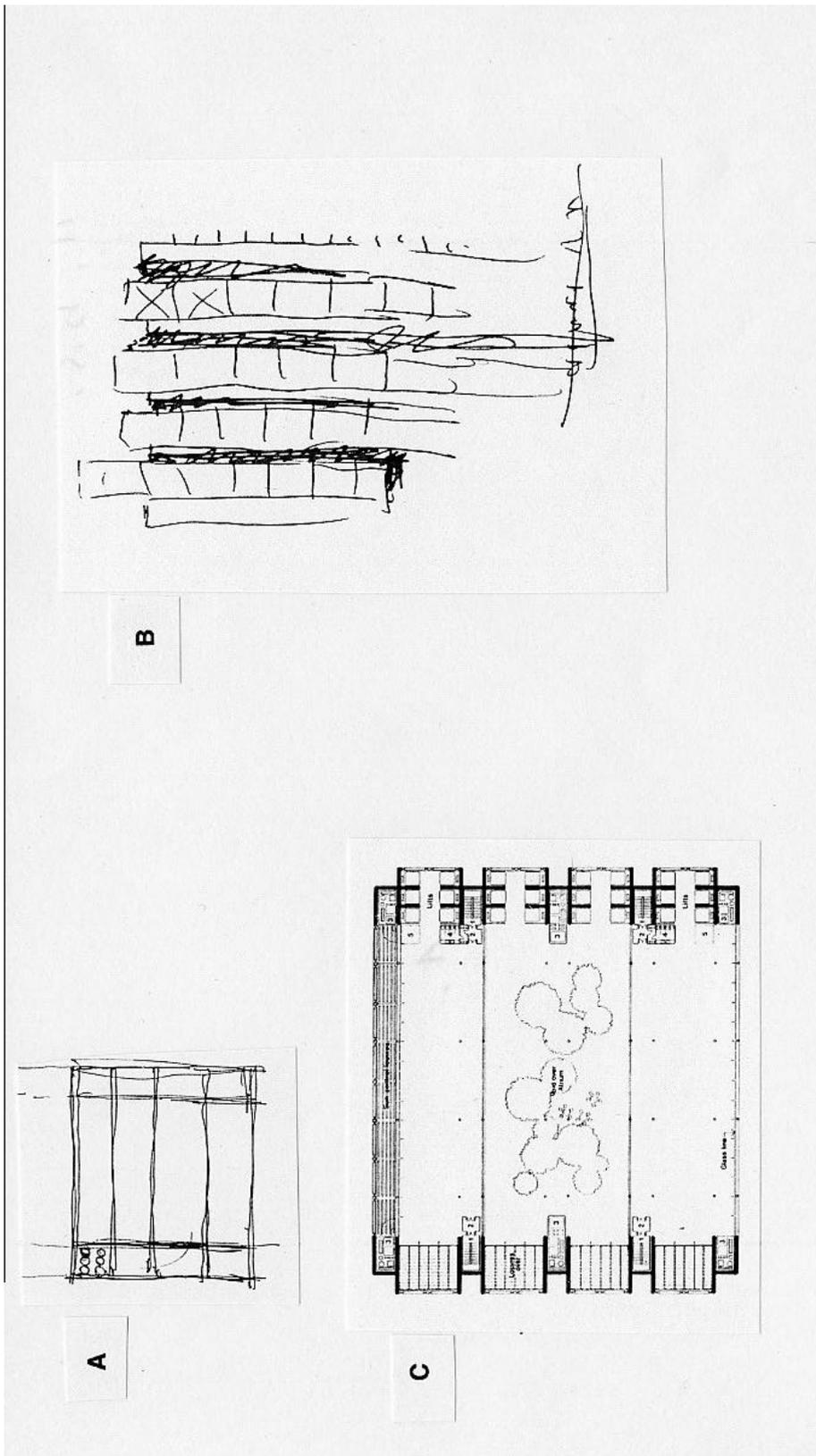


Planche 3 : Mies van der Rohe, Pavillon allemand, Barcelone (1928-1929).



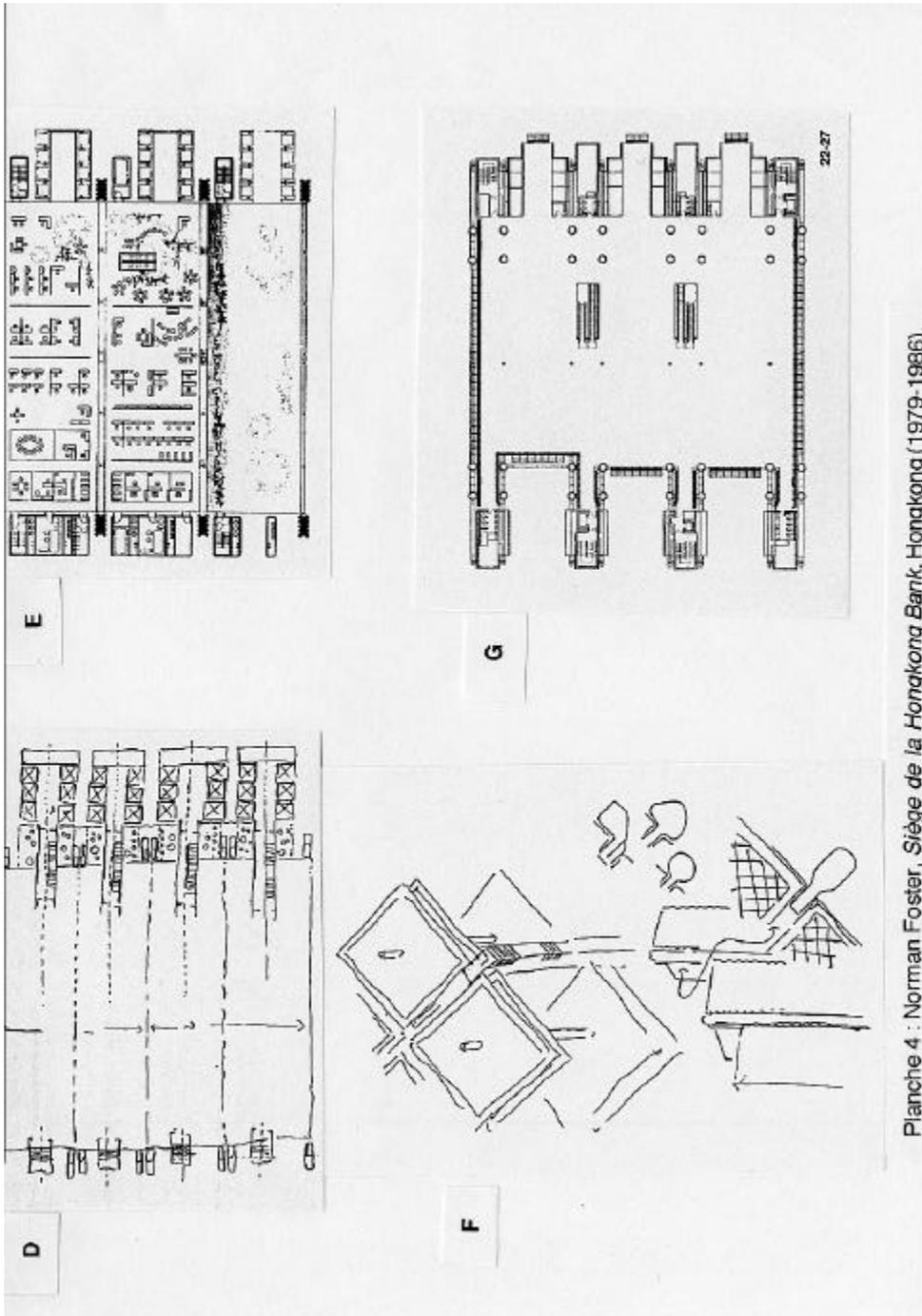


Planche 4 : Norman Foster, Siège de la Hongkong Bank, Hongkong (1979-1986).