

L'industrie du Béton Préfabriqué: Une Simulation de son Fonctionnement et de ses Ressources.

F. Moavenzadeh et S. Frondistou-Yannas.

Du fait de la rapidité de l'expansion récente de l'industrie du béton préfabriqué, les décisions doivent être prises en fonction d'une évaluation de leurs conséquences éventuelles. Un modèle fondé sur une approche dynamique a été mis au point, en tenant compte de la structure de l'industrie. Ce modèle montre les relations causales qui existent entre les différentes variables. Il découle de certaines hypothèses concernant le marché, la demande, la concurrence, l'objectif des systèmes de préfabrication, les subventions nécessaires pour la recherche et la mise au point des techniques proposées, les investissements, la main-d'œuvre et l'échelle de la production. Ce modèle est flexible; il a été mis à l'épreuve en comparant les prévisions faites dans le passé immédiat et l'état actuel de l'industrie. Une expérience «standard» est décrite. Elle a été mise au point à partir d'extrapolations sur la situation du moment. Elle a été comparée avec la situation qui pourrait survenir si les tendances de certaines variables étaient modifiées. L'utilisation de l'usine est un facteur important qui nécessite de prévoir exactement la demande et de planifier la production d'une façon appropriée. Si ces conditions sont satisfaites, on peut prévoir une expansion continue de l'industrie. Les systèmes préfabriqués seront probablement de plus en plus utilisés. Du fait des économies d'échelle, les facteurs qui ne sont pas affectés par le développement de la préfabrication du béton deviennent plus importants; ce sont notamment la durée du montage et la main-d'œuvre. Les prêts avantageux du gouvernement pour la construction du logement à prix économique ont tendance à favoriser le logement coûteux. Les travaux de recherche et de mise au point deviendront probablement plus efficaces, avant même que la performance de l'industrie atteigne sa maturité.

Les auteurs:

M. Moavenzadeh est professeur de génie civil à M.I.T., et il enseigne également à la Graduate School of Design de Harvard University. Diplômé en génie civil de la Purdue University (doctorat) et de la Cornell University (maîtrise) M. Moavenzadeh est particulièrement intéressé par l'industrie de la construction et par les rôles que peuvent jouer les différents participants de cette industrie.

Dr. S. A. Frondistou-Yannas est professeur adjoint de génie civil à M.I.T. Diplômé d'une part de l'Université Technique Nationale d'Athènes et de M.I.T. (maîtrise et doctorat en génie civil) et d'autre part de la Sloan School of Management (maîtrise), Dr. Yannas a entrepris de nombreuses recherches et publié un certain nombre d'articles sur l'industrie du béton préfabriqué.

Remerciements:

Nous remercions particulièrement M. A. L. Pugh III pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée lors de l'élaboration de notre modèle. Nous remercions aussi la Ford Foundation qui a financé en partie ces travaux de recherche.

Vol. 6, (1975), No. 5.

Introduction.

L'industrie du béton préfabriqué s'est énormément développée au cours de ces dernières années¹. Il en résulte que les décisions prises actuellement affecteront d'une façon cruciale son développement futur. En conséquence, il est indispensable et opportun d'identifier les grands problèmes auxquels l'industrie doit faire face et d'évaluer systématiquement les conséquences des solutions dont dispose l'industrie.

La politique restrictive du monde de la main-d'œuvre est bien connue. Le point de vue des syndicats sur l'impact de la préfabrication à l'égard de la sécurité de l'emploi, du contrôle juridictionnel, des problèmes de santé et de sécurité détermine toute réaction et amène les syndicats à se demander s'ils doivent encourager, freiner, contrôler ou entraver l'introduction de la préfabrication.

Il n'existe pratiquement pas d'études approfondies sur l'impact de la résistance des syndicats à l'égard de l'utilisation du béton préfabriqué. Cette situation résulte d'un grand nombre de causes, parmi lesquelles il faut mentionner la fragmentation de l'industrie et de ses différents syndicats et surtout la diversité des réactions de ceux-ci qui rend toute généralisation impossible, outre les mesures restrictives qui résultent non seulement de l'attitude syndicale, mais aussi du rôle joué par les entrepreneurs et les fournisseurs. On peut donc en arriver à la conclusion que les syndicats jusqu'à présent n'ont pas utilisé toutes leurs ressources (qui sont considérables) pour opposer une véritable résistance à la préfabrication.

Mais qu'arriverait-il si les syndicats exerçaient tout leur pouvoir dans l'espoir de créer plus d'emplois pour leurs membres et d'augmenter les salaires dans les usines? Une étude des effets d'un tel changement serait d'une grande utilité pour l'industrie.

Un Aperçu du Modèle.

La Figure 1 donne un aperçu du modèle. Les flèches rejoignent deux variables qui ont une relation entre elles, de telle sorte que la flèche se dirige de la variable qui cause un changement vers la variable qu'elle affecte. Comme l'indiquent ces flèches, la causalité peut être linéaire ou circulaire, formant un circuit continu fermé, c'est-à-dire une boucle d'une variable à une autre et ainsi de suite. Pour simplifier la présentation de ce diagramme, la Figure 1 ne montre que les principales variables du modèle et les voies directes qui les relient; dans le modèle le plus détaillé, par contre, on trouve plusieurs réseaux passant par des variables intermédiaires. Ce modèle détaillé a été publié dans un autre document⁸.

Les chaînes du modèle reliant causes et effets sont les suivantes:

1. Le coût des produits détermine en partie le marché du béton préfabriqué, qui, selon sa grandeur influence le coût du produit (voir fig. 1 la boucle qui regroupe la séquence suivante: performance économique — préférence de l'architecte — part du marché du béton préfabriqué — marché du béton préfabriqué — performance économique).
2. Comme le béton préfabriqué commence à acquérir une portion significative du marché, l'industrie du béton conventionnel se développe de son côté grâce à la mécanisation; celle-ci augmente la concurrence et diminue la portion du marché qui pourrait être acquise par l'industrie du béton préfabriqué (voir fig. 1 la boucle qui regroupe la séquence suivante: part du marché du béton préfabriqué — performance économique des concurrents — préférence de l'architecte — part du marché du béton préfabriqué).
3. La qualité du produit, c'est-à-dire sa performance technique et sa commercialisation, détermine la grandeur du marché, qui à son tour influence l'importance des fonds qui seront dépensés pour les travaux de recherche et de mise au point; ceux-ci, en retour, affectent la qualité du produit (voir, fig. 1, la boucle regroupant la séquence suivante: performance du produit et commercialisation — préférence de l'architecte — part du marché du béton préfabriqué — marché du béton préfabriqué — fonds destinés à la recherche et à la mise au point — performance du produit et commercialisation).

Le modèle repose sur un certain nombre d'hypothèses:

1. Le principal marché de l'industrie du béton préfabriqué inclut a) des logements économiques multi-familiaux b) des logements plus coûteux et c) tous les autres bâtiments hauts ou moyennement hauts.
2. La construction conventionnelle en béton est le principal concurrent de ce marché.
3. Les données sur la demande réelle dans chacune des trois catégories mentionnées précédemment correspondent à une variable qui se situe en dehors du modèle. Autrement dit, la performance de l'industrie du béton préfabriqué n'affecterait pas la grandeur du marché. Mais le produit préfabriqué augmenterait sa part du marché aux dépens de la construction en béton conventionnelle. Le marché du logement économique qui semble avoir tendance à se développer au fur et à mesure que l'industrie du béton préfabriqué s'accroît, est une exception à cette observation.
4. L'architecte est réellement la personne qui détermine la portion du marché qui sera acquise par l'industrie du béton préfabriqué. Sa décision découle d'une évaluation du produit préfabriqué qui elle-même dépend de trois facteurs:
 - les qualités du produit qui satisfont le client, (flexibilité, esthétique, etc) — et qui facilitent sa commercialisation;
 - la performance technique, qui dans le cas d'un bâtiment sera, par exemple, l'isolation thermique, l'isolation acoustique, la résistance au feu et l'étanchéité à l'eau;

— la performance économique — outre le coût initial, les critères de performance économique à long terme incluent normalement l'entretien, les services et la longévité du produit.

5. Les systèmes en béton préfabriqué se développeront selon la séquence suivante :

- préfabrication de la structure et de l'enveloppe,
- préfabrication de la structure, de l'enveloppe et des finis,
- développement de systèmes complets, c'est-à-dire de systèmes qui intègrent à la fois l'équipement électrique et mécanique.

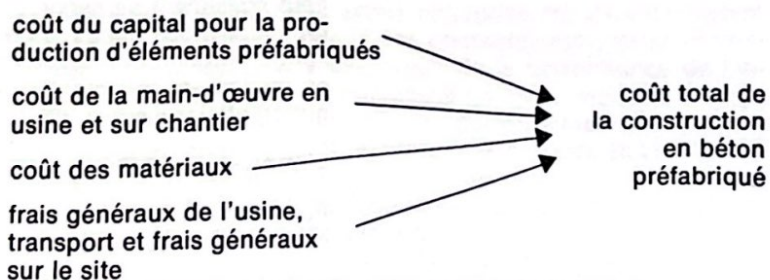
Le modèle tient compte de l'aspect dynamique de l'industrie dans les trois degrés de préfabrication mentionnés ci-dessus.

6. Les travaux de recherche et de mise au point améliorent à la fois la performance économique et technique du produit et sa commercialisation. Les fonds de recherche proviennent essentiellement de trois sources : le gouvernement, l'industrie et les consommateurs. On présume que le niveau de performance d'un produit — que ce soit sur le plan technique, commercial ou économique — s'accompagne d'une augmentation sigmoïde. En effet, le taux de l'accroissement de la performance par dollar dépensé en recherche est minime au début du lancement d'un produit. Par suite la performance augmente d'autant plus rapidement que le produit vieillit ; cependant l'accroissement de la performance diminue au fur et à mesure que le produit approche de sa maturité.
7. Puisque l'industrie du béton préfabriqué nécessite un capital considérable, l'instabilité de l'industrie de la construction fait de tout investissement une proposition hasardeuse.
8. La résistance des syndicats à l'égard de la construction préfabriquée se traduit par la pression qu'elle exerce sur l'industrie, la poussant à utiliser une main-d'œuvre plus grande que nécessaire.
9. Les économies d'échelle réalisées sur certains éléments du coût total : capital, frais généraux de l'usine, main-d'œuvre en usine, matériaux, etc. pour produire une superficie de béton de plus d'un million de pieds carrés par an.

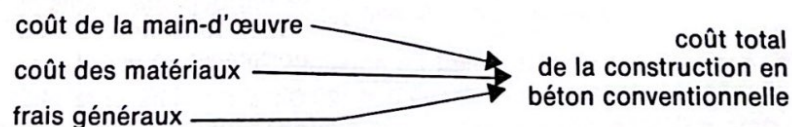
Les principales caractéristiques du modèle sont les suivantes :

1. Le modèle décrit d'une façon détaillée la performance économique à court terme, c'est-à-dire le coût initial de la construction en béton préfabriqué. Les éléments du coût sont :

a) Pour l'industrie du béton préfabriqué :



b) Pour l'industrie en béton conventionnelle (secteur concurrentiel) :



2. Le modèle porte essentiellement sur des systèmes de construction en béton préfabriqué. Cependant une partie de la production de l'industrie se présente sous forme de composants en béton préfabriqué qui sont vendus pour la construction des bâtiments et des

ponts. Le modèle permet de faire une estimation des composants produits afin d'identifier les exigences en ce qui concerne la capacité de l'usine et les économies que l'on peut réaliser du fait de l'ampleur des travaux.

3. L'industrie du béton préfabriqué est constituée par une série de marchés régionaux qui présentent leurs propres particularités. Le modèle, sous sa forme actuelle, cherche à évaluer la performance d'une usine « moyenne », c'est-à-dire la grandeur, l'efficacité, le marché et les coûts moyens. La performance d'une usine moyenne multipliée par le nombre d'usines existantes devrait donner la valeur des revenus, des profits, de la superficie de béton vendu, etc. correspondant à l'ensemble de l'industrie. Ces chiffres pourraient être des indices très utiles sur la performance industrielle, qui à son tour influence les décisions stratégiques de l'industrie.
4. Le modèle simule le fonctionnement de l'industrie du béton préfabriqué aux États-Unis au cours de la période s'étalant de 1960 à 1985. Les travaux mentionnés sont limités à la préfabrication hors chantier, c'est-à-dire à la fabrication de composants de construction en usine.

La Flexibilité du Modèle.

Le modèle présenté dans cette étude peut tenir compte de n'importe quelle stratégie et de n'importe quelle condition du marché, à condition qu'on évalue d'une façon très nette l'impact du marché sur les éléments du coût et de la demande pour les différents types de construction. Prenons, par exemple, la crise de l'énergie actuelle et supposons que cette crise a les implications suivantes pour l'industrie du béton préfabriqué :

- a) la demande de logements baisse de 20% à cause de la récession générale,
- b) le coût de l'argent prêté à l'industrie augmente de 3%, et
- c) le coût de l'énergie augmente de 100%.

En présence de ces variables, il faut donc :

- a) multiplier par 0,8 l'équation qui nous donne la demande en logements,
- b) ajouter 3% à la valeur du coût de l'argent payé par l'industrie,
- c) accroître de 100% l'estimation du coût de l'énergie pour le producteur prévue par le modèle.

Tous les changements qui tiennent compte des implications de la crise de l'énergie sur l'industrie dans cet exemple hypothétique, peuvent être évalués immédiatement grâce à notre modèle. En outre, on peut également se servir de ce modèle pour faire des expériences et répondre à des questions telles que « Qu'arrivera-t-il si la crise de l'énergie entraîne éventuellement une diminution de 10% de la demande en matière de logement ? » « Qu'arrivera-t-il au contraire si cette diminution atteint jusqu'à 30% ? »

L'Analyse du Modèle.

Pour évaluer la validité ou l'utilité du modèle construit au cours de cette étude, nous avons fait divers essais.

1. On a cherché à savoir si le modèle avait la capacité de retracer des données historiques. Cet essai est une condition essentielle pour s'assurer de la validité du modèle, mais il n'est pas suffisant puisque le regroupement aléatoire de données erronées et des caractéristiques de la structure de l'industrie peuvent entraîner le même comportement apparent.
2. On a examiné si le modèle pouvait mettre en évidence l'influence de certaines questions particulièrement importantes. On a donc cherché
 - à évaluer le comportement de l'ensemble du modèle en fonction des connaissances générales que l'on possède sur l'industrie et en fonction de la constance de ce comportement ;

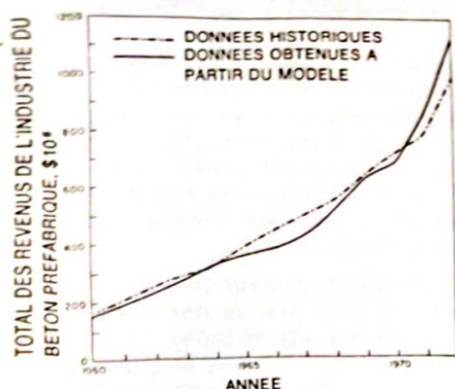


Figure 2. Vérification du modèle par rapport aux données historiques.

- à évaluer les éléments spécifiques et isolés du modèle qui présentaient certains types de réactions afin de déterminer s'ils se manifestaient avec une certaine persistance et en fonction de notre compréhension des éléments spécifiques de l'industrie;
- à faire une analyse de sensibilité chaque fois qu'on se demandait si les hypothèses ou les estimations qui n'étaient pas solidement établies sur des données, affectaient les résultats d'une façon significative;
- à comparer les prévisions déduites à partir de notre modèle et quelques évaluations indépendantes puisées dans la littérature, quoique celle-ci renferme assez peu d'évaluations sur la performance future de l'industrie du béton préfabriqué.

Même si nous n'avons pas pu établir une preuve définitive de la validité du modèle, nous pouvons dire cependant qu'il est valable puisque dans tous les cas il conforme aux critères établis.

C'est grâce à ce modèle que nous avons pu obtenir les résultats que nous exposerons ci-dessous.

Un Modèle des Données Historiques.

Étant donné que les données sur l'industrie du béton préfabriqué sont assez rares et que la plupart des données existantes sont utilisées pour élaborer des équations du modèle, il existe très peu d'informations qui permettent de comparer les résultats obtenus par simulation. Dans les quelques cas où cette approche était possible, la comparaison des résultats obtenus à l'aide du modèle, mais avec des données indépendantes, était tout à fait acceptable.

La Figure 2, par exemple, montre le volume des ventes de l'industrie du béton préfabriqué au cours de la période 1960-1972. Cette Figure indique aussi le volume des ventes de l'industrie auquel on était arrivé par simulation avec le modèle. Dans aucun cas, les résultats obtenus à l'aide du modèle ne s'écartent de plus de 15% des données historiques sur l'ensemble des revenus. La Figure 3 compare les coûts de la construction conventionnelle, tels que prévus à l'aide du modèle, avec les données sur les coûts réels, obtenus dans la littérature. On se rend compte alors que les résultats obtenus en utilisant le modèle n'accusent jamais une déviation de plus de 7% par rapport aux données réelles.

L'Expérience Standard.

L'expérience standard que nous avons entreprise est essentiellement une extrapolation à partir des conditions courantes auxquelles l'industrie fait face. Elle présente une évaluation de la performance de l'industrie du béton préfabriqué, déterminée à l'aide du modèle, en supposant que les stratégies de l'industrie, du gouvernement, de la main-d'œuvre demeurent constantes et que la demande reste stable. Le but de cette expérience est de servir de point de repère afin de pouvoir établir une comparaison avec les résultats obtenus lorsque les stratégies ou les conditions du marché varient.

Les résultats obtenus à l'aide de cette expérience révèlent :

- une augmentation de l'ensemble des revenus de l'industrie, au cours de la période 1975 à 1985, plus marquée que celle des cinq dernières années (si l'on compare les figs. 2 et 4); elle est due à :
 - a) un accroissement de la qualité du béton préfabriqué par rapport à celle du béton produit par le marché concurrentiel et
 - b) une amélioration de la performance économique du béton préfabriqué par rapport à celle des concurrents.

Ce phénomène est probablement dû au fait que le produit concurrentiel, qui est proche de sa maturité, améliore sa performance à un taux beaucoup moins rapide (voir hypothèse no. 6);

— la répartition de la demande pour les différentes catégories de produits montre que

- a) l'augmentation de la demande pour les produits de l'industrie dans les années 1970 est plus prononcée pour les systèmes de construction par opposition à la demande pour les composants destinés à la construction des bâtiments et des ponts (fig. 5). Malgré leur retard par rapport aux autres produits préfabriqués au cours des années 60, les systèmes de construction constituent la principale production de l'industrie vers les années 75-76, après avoir reçu l'approbation des architectes;
 - b) dans la catégorie des systèmes en béton préfabriqué, c'est le logement économique qui impose la plus grande demande et non pas le logement plus coûteux ou les autres types de bâtiments (fig. 5). Ce phénomène est dû au fait que les contraintes inhérentes au béton préfabriqué — qui imposent une certaine géométrie, etc. — constituent un inconvénient beaucoup plus grand lorsqu'on construit des bâtiments luxueux et que le marché du logement économique est beaucoup plus grand que le logement à un prix plus élevé;
- les relations coût/temps des produits de la structure et de l'enveloppe construits en béton préfabriqué sont indiquées par la Figure 6. La Figure 3 par contre montre les relations coût/temps de l'industrie du béton conventionnelle. Une comparaison de ces deux figures indique que

- a) vers le milieu des années 70 le coût total du béton préfabriqué devient moins grand que celui de la construction conventionnelle en béton, et que
- b) le coût du capital investi dans l'industrie du béton préfabriqué décroît vers la fin des années 70 et au début des années 80.

Ces résultats peuvent être attribués à deux hypothèses principales.

(i) L'industrie, qui paie des taux d'intérêt avantageux, jouit d'une durée d'amortissement beaucoup plus longue, puisque les prêteurs aussi bien que les directeurs de gestion sont assurés de l'expansion d'un marché plus stable, (la stabilité de l'expansion du marché étant une des hypothèses de notre expérience standard).

(ii) Les économies d'échelle s'accroissent au fur et à mesure que la grandeur de l'usine de béton préfabriqué passe du simple au double, au cours des années 1960-1985. Les économies qui découlent d'un accroissement de l'importance de l'usine sont considérées comme étant le résultat le plus tangible d'une part de l'efficacité de la technologie employée pour obtenir le plus grand volume et d'autre part de la qualité de la gestion que seules les plus grandes usines peuvent s'offrir.

c) On ne prévoit aucune économie de matériaux puisqu'on n'envisage pas que la production d'une usine moyenne dépasse un million de pied carrés (100 000m²) de béton par an à partir de 1985 — superficie qui doit être dépassée avant que l'usine puisse bénéficier de rabais.

d) Certaines économies d'échelle peuvent réduire l'accroissement des frais généraux — accroissement qui résulte de l'augmentation du coût de la vie.

e) Par contre, on prévoit des économies substantielles en ce qui concerne les coûts de la main-d'œuvre dans le cas du béton préfabriqué.

Une étude plus approfondie des économies réalisées sur les coûts de la main-d'œuvre montre (i) qu'il y a une diminution significative des hommes/heures nécessaires à la construction préfabriquée et (ii) que les salaires de la main-d'œuvre en usine sont bien inférieurs aux salaires de la construction sur chantier. Une telle différence entre les salaires a tendance à entraîner une diminution des hommes/heures sur chantier pour le montage et le jointoiement des produits préfabriqués. Quoique le nombre d'hommes/heures sur

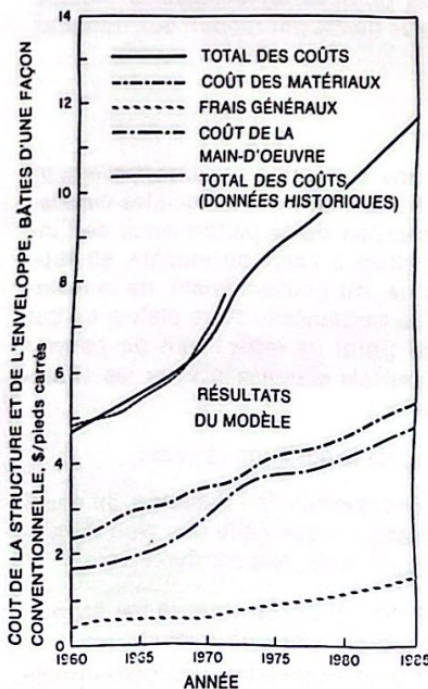


Figure 3. Application du modèle à la construction en béton conventionnelle.

chantier soit moins important que le nombre d'hommes/heures en usine, les coûts de la main-d'œuvre sur chantier dépassent de beaucoup ceux de la main-d'œuvre en usine tout simplement parce que les salaires sont plus élevés.

Dans le cas de la construction conventionnelle (fig. 3), le taux d'accroissement des coûts de la main-d'œuvre diminue au cours des années 70. Ce phénomène est dû au fait que l'industrie du béton conventionnelle a recours à une mécanisation poussée pour faire face au défi imposé par la construction en béton préfabriqué. L'accroissement des frais généraux dû à cette amélioration de la mécanisation est largement compensé par une diminution des coûts de main-d'œuvre. Il s'ensuit d'après le modèle que la concurrence entraîne un abaissement des coûts.

Il est possible d'utiliser le modèle pour calculer le pourcentage d'économies réalisées sur l'ensemble des coûts d'un bâtiment construit à l'aide de composants en béton préfabriqué. L'étude de ces économies est particulièrement intéressante dans le cas du logement économique, puisque le modèle prévoit que si ces économies dépassent un taux critique (10% d'après notre modèle), la demande réelle du logement économique pourrait augmenter. Les résultats du modèle indiquent que même vers 1985, le pourcentage d'économies réalisées dans le domaine du logement économique grâce à l'utilisation du béton préfabriqué n'est pas suffisant (puisqu'il ne s'élève qu'à 6%) pour parler d'une expansion du marché. Les éléments en béton préfabriqué ne font que remplacer les éléments en béton conventionnel au cours de la période étudiée.

Le Changement des Variables.

Les fluctuations de la demande pour le logement multi-familial.

Les résultats indiqués par le modèle diffèrent de ceux de l'expérience standard parce que la demande pour le logement multi-familial qu'on avait présumée stable au cours de la période 1973-1985 dans l'expérience standard, a été remplacée par une demande changeante.

Les résultats obtenus à l'aide du modèle montrent que l'industrie traverse des cycles au cours desquels sa capacité n'est pas utilisée au maximum. Ces résultats sont utiles parce qu'ils montrent que les prévisions de la demande et la planification du rendement de l'usine sont d'une importance critique pour l'industrie. Lorsque nous avons poursuivi l'étude de ces résultats en présumant certaines fluctuations de la demande, nous avons supposé que l'industrie, par suite d'une planification adéquate, réussissait à maintenir un niveau d'utilisation élevé et constant. Les résultats montrent qu'une oscillation de la demande n'a pas un effet dramatique sur l'expansion de l'industrie (fig. 4). Ces résultats concordent avec les prévisions du modèle qui permettent de conclure qu'il est possible de réaliser des économies d'échelle sur certains éléments du coût, tant que l'industrie se développe et que la production de l'usine moyenne continue à s'accroître. Étant donné que tous les éléments du coût ne sont pas sujets à des économies dues à l'ampleur de la production, les composants affectés par ces économies ne représentent qu'une fraction relativement limitée dans l'ensemble des coûts. C'est pourquoi, les conditions du marché ou les stratégies qui affectent les coûts ont de moins en moins d'influence au fur et à mesure que le temps avance et que la production moyenne augmente. Tant que l'industrie maintient un niveau d'utilisation élevé et constant, les oscillations de la demande incitent les promoteurs et les responsables de gestion à considérer que l'industrie de béton préfabriqué est une entreprise risquée. Cette attitude entraîne nécessairement une augmentation des taux d'intérêt et une diminution de la durée de l'amortissement. Ces facteurs en retour affectent l'élément « capital » dans l'ensemble des coûts, qui — sujet à des économies d'échelle vers le milieu des années 70 — représente une fraction relativement moins grande dans l'ensemble des dépenses.

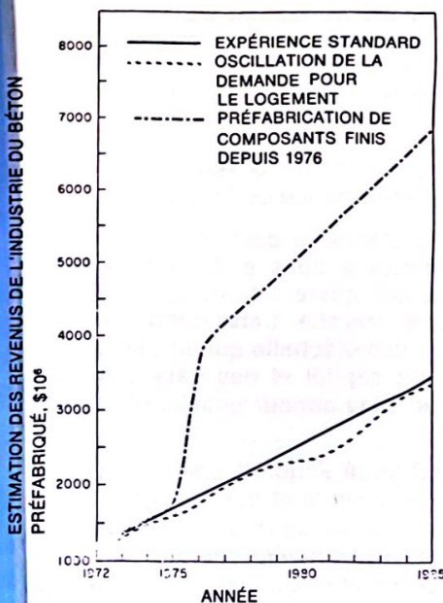


Figure 4. Utilisation du modèle pour prévoir l'ensemble des revenus de l'industrie du béton préfabriqué sous l'effet de conditions normales et du changement de deux variables.

Les prêts à un taux relativement bas offerts par le gouvernement à l'industrie du béton préfabriqué.

Pour les mêmes raisons que celles que nous avons mentionnées ci-dessus, une politique gouvernementale garantissant des prêts avantageux à l'industrie ne semblent pas avoir des effets dramatiques, s'ils sont donnés à une époque où l'industrie se développe au point que les économies d'échelle réduisent l'élément « capital » à une petite fraction de l'ensemble des coûts.

Par ailleurs, on a constaté également que la gratification de prêts à un taux avantageux à l'industrie semble avantager le logement plus coûteux. Selon le modèle, ce phénomène est dû au fait que le coût du capital se répartit proportionnellement au nombre d'hommes/heures. Puisque le logement coûteux entraîne une plus grande demande d'hommes/heures, il nécessite un plus grand investissement de capital et c'est pourquoi il bénéficie des économies faites dans ce domaine. Ces résultats sont tout à fait plausibles dans le cas des hypothèses que nous avons envisagées. Ils nous amènent à conclure qu'un gouvernement qui cherche à diminuer réellement le coût du logement économique grâce à une politique de subventions avantageuses, doit imposer un ensemble de conditions sur la répartition des coûts du capital pour que son intervention puisse avoir l'effet voulu.

Notre modèle est suffisamment flexible pour examiner toute intervention gouvernementale dans différents types de situations, c'est-à-dire en fonction d'hypothèses tout à fait variées.

Variations du pourcentage de la construction préfabriquée.

Une expérience fut entreprise à l'aide de notre modèle, d'une part pour étudier quel est le pourcentage d'un type de construction donnée qui offre le plus grand profit à l'industrie du béton préfabriqué et d'autre part pour examiner comment ce pourcentage pouvait varier dans le temps. Les hypothèses à l'origine de cette expérience diffèrent de l'expérience standard en ce sens qu'on considère que depuis le début de 1976 l'industrie préfabrique non seulement les éléments de la structure et de l'enveloppe mais aussi les composants finis.

Les résultats montrent (fig. 4) qu'il serait profitable pour l'industrie du béton préfabriqué de passer à la préfabrication de composants finis dès 1976*. Une telle décision augmenterait les revenus de l'industrie, puisque la part du marché qui lui est affectée, se développerait énormément accaparant ainsi un plus grand pourcentage de la construction.

Il est intéressant de retracer la façon dont les différentes relations entre causes et effets déterminent la performance de l'industrie.

- Au fur et à mesure que le béton préfabriqué devient concurrentiel (grâce aux économies de main-d'œuvre dues à la préfabrication des finis qui demandent une main-d'œuvre intensive), l'industrie obtient une plus grande fraction du marché. Cette condition favorable permet la réalisation d'économies d'échelle qui en partie compensent l'accroissement du coût du capital et des frais généraux. L'industrie devient donc de plus en plus concurrentielle et le cycle a tendance à se répéter.
- Puisque l'industrie du béton préfabriqué acquiert une plus grande partie du marché, elle augmente les revenus et par conséquent dispose de plus grands fonds pour les travaux de recherche et de mise au point. Cet investissement provoque une amélioration de la qualité du produit qui devient plus concurrentiel et qui assure l'acquisition d'une plus grande part du marché.
- Quant à la différence de coût entre les produits préfabriqués et ceux de leurs concurrents, elle est réduite grâce à la mécanisation — méthode à laquelle l'industrie du béton conventionnelle a normalement recours.

* D'après une recherche achevée en 1973 et publiée en 1973 et en 1974.

Les résultats de ces trois chaînes reliant causes et effets (performance économique — marché — performance économique, qualité du produit — marché — qualité du produit et coûts concurrentiels — mécanisation de la construction conventionnelle — coûts concurrentiels) mettent en évidence un accroissement de la qualité de la construction alors que les coûts diminuent.

Ces résultats montrent donc que la préfabrication d'un plus grand pourcentage de construction est une façon attrayante d'accroître la demande réelle du logement économique. En fait, les économies qui résultent de l'utilisation de la préfabrication pourraient être de l'ordre de 12% vers 1985 pour le marché du logement en économique. Les chiffres correspondants lorsqu'on ne préfabrique que les éléments de la structure et de l'enveloppe — c'est-à-dire lorsqu'on exclut les composants finis — représentent des économies d'environ 6%.

Par ailleurs, quoiqu'il soit possible de réaliser de plus grandes économies en préfabriquant les éléments du logement plus coûteux, le logement économique reste le principal marché de l'industrie du béton préfabriqué. Ce phénomène est dû au fait que le logement multi-familial appartient presque toujours au logement économique.

Les résultats du modèle expérimental sont, bien entendu, établis sur un ensemble spécifique d'hypothèses. Parmi celles-ci, il faut mentionner les hypothèses concernant l'augmentation du capital et des frais généraux qui sont indispensables pour que l'industrie puisse préfabriquer des composants finis en usine. Les chiffres indiqués par le modèle correspondent au jugement que nous pouvons porter grâce à notre expérience, puisqu'il n'existe aucune donnée publiée à ce sujet. Il était donc utile d'avoir recours à différentes hypothèses quantitatives. Cherchant à étudier ce problème au cours d'une expérience subséquente à l'aide de notre modèle, nous avons supposé que le capital et les frais généraux seraient plus élevés au fur et à mesure que l'industrie s'emparerait d'un plus grand pourcentage de la construction. En outre, le modèle prévoyait que si l'industrie passait vers 1976 à la préfabrication de la structure, de l'enveloppe et des finis, elle en viendrait à la préfabrication de systèmes complets vers 1980.

Nos résultats montrent qu'à la longue, il semble plus avantageux pour l'industrie de passer à la préfabrication d'éléments finis et même à la préfabrication de systèmes tout entiers. À court terme, cependant, les contraintes financières imposées par l'accroissement du capital et des frais généraux entravent la performance de l'industrie, si l'on se réfère à la superficie de béton vendu (fig. 5). Ce phénomène est dû au fait qu'un plus grand investissement de capital et de plus grands frais généraux affectent la concurrence économique du produit, de telle sorte que la part du marché acquise par l'industrie du béton préfabriqué diminue et l'utilisation des usines devient moins importante. Enfin, la réduction de l'utilisation de l'usine à son tour limite la performance de l'industrie. C'est pourquoi une fois que l'industrie sera débarassée (dans trois ans environ) de son excès de capacité et que de nouveau son utilisation sera maximum, l'industrie du béton préfabriqué deviendra encore une fois concurrentielle du point de vue économique. Cette situation mènera par contre coup à l'acquisition d'une plus grande partie du marché et entraînera des économies d'échelle qui renforceront la concurrence économique du produit.

Il est intéressant de noter que les revenus de l'industrie seront plus grands que l'expérience standard le prévoit, du fait de l'augmentation du pourcentage de la construction préfabriquée, lorsque l'industrie en viendra à préfabriquer des systèmes complets. Cette observation semble constante même au cours des périodes où les coûts élevés et l'utilisation minimum de l'usine entraînent une diminution de la superficie de béton vendu par l'industrie.

L'allocation des fonds de recherche.

On a entrepris une autre série d'expériences à l'aide de notre modèle

pour étudier quelle était la meilleure répartition des fonds de recherche et de mise au point. Il s'agit dans ce cas de faire un choix entre l'amélioration de la performance en ce qui concerne les facteurs, tels que la qualité et la commercialisation du produit et l'abaissement des coûts. Les résultats indiquent que la meilleure stratégie varie en fonction du temps.

De plus, on a pu constater que le développement de la qualité d'un produit ou l'abaissement de son coût par une amélioration de la technologie de production et d'assemblage a un effet plus dramatique, lorsque le produit est loin d'être à maturité. Cette constatation repose sur le fait que le modèle présume une augmentation sigmoïde de la performance et de la technologie du produit, ce taux d'accroissement diminuant au fur et à mesure que le produit approche de sa maturité.

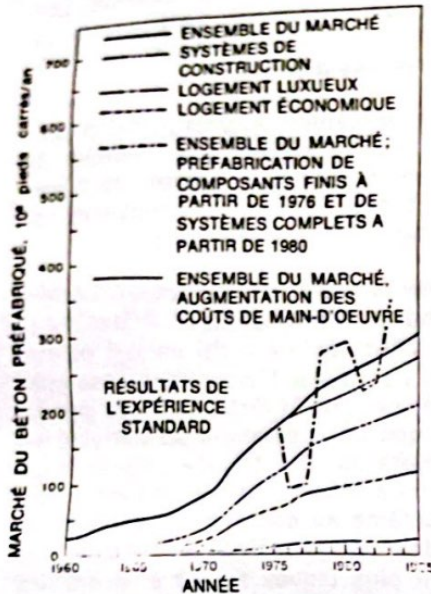


Figure 5. Utilisation du modèle pour prévoir l'ensemble du marché, secteurs par secteurs, sous l'effet de conditions normales et du changement de deux variables.

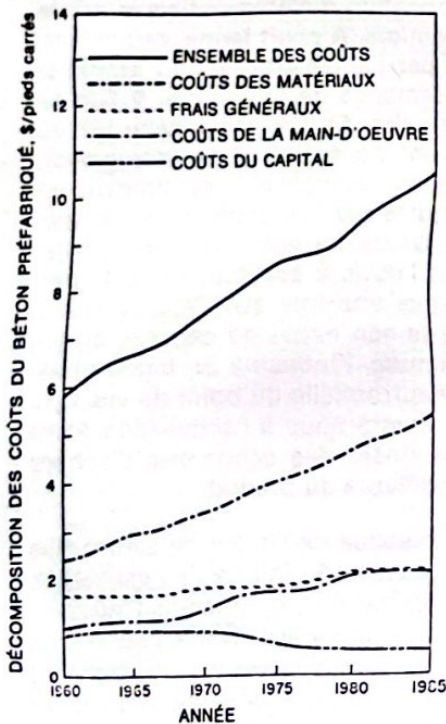


Figure 6. Utilisation du modèle pour prévoir la décomposition des coûts de la construction en béton préfabriqué (expérience standard).

Stratégie politique et main-d'œuvre.

Quel serait donc l'effet de l'industrie du béton préfabriqué si les salaires de la main-d'œuvre en usine étaient identiques à ceux de la main-d'œuvre sur chantier? Qu'arriverait-il d'autre part si les exigences de la main-d'œuvre de l'industrie, à la fois sur chantier et en usine, augmentaient? Un tel accroissement du nombre d'hommes/heures pourrait être le résultat d'une réduction de la durée hebdomadaire du travail, de l'allongement des pauses ou de la période des vacances, etc.

Pour étudier les questions mentionnées ci-dessus, une expérience fut donc de nouveau entreprise à l'aide de notre modèle. Elle était différente de l'expérience standard puisqu'on envisageait que:

- depuis 1974, les salaires de la main-d'œuvre en usine seraient identiques aux salaires sur chantier;
- et qu'il y aurait une augmentation de 10% des exigences de main-d'œuvre, aussi bien sur chantier qu'en usine.

L'utilisation du modèle indique que l'augmentation brutale de la main-d'œuvre et des salaires en 1974 entraîne une diminution de la concurrence économique de l'industrie. Un tel déclin provoque évidemment une diminution de la demande pour les produits en béton qui entraîne également une diminution de l'utilisation des usines (facteur qui accélère le déclin existant de la concurrence économique de l'industrie).

Espérant protéger l'industrie de ces effets, on entreprit une seconde expérience en supposant une utilisation importante des usines. De cette façon, les effets d'un changement de politique à l'égard de la main-d'œuvre pouvaient être étudiés indépendamment des effets causés par la réduction de la capacité des usines.

Les résultats de cette expérience indiquent que même si la politique à l'égard de la main-d'œuvre affecte d'une façon négative l'expansion industrielle (mesurée en fonction de la vente et de l'ensemble des revenus), elle ne l'amène pas à un arrêt définitif (fig. 5). On en vient à cette conclusion parce qu'il ne faut pas négliger que l'industrie du béton conventionnelle devient également moins compétitive tant que l'attrait économique de l'industrie du béton préfabriqué ne la pousse pas à avoir recours à la mécanisation pour améliorer sa performance. On peut argumenter aussi que les coûts de la main-d'œuvre constituent une fraction relativement limitée de l'ensemble des coûts vers le milieu des années 70, puisque le travail en usine est sujet à des économies d'échelle.

Conclusions.

L'expansion rapide de l'industrie du béton préfabriqué a fait naître récemment le besoin d'évaluer systématiquement les conséquences des stratégies et des conditions qui prévalent dans l'industrie, afin de prendre les décisions appropriées au moment crucial.

La situation de l'industrie est déterminée par un très grand nombre de variables qui agissent les unes sur les autres d'une façon complexe en fonction du temps. Il s'ensuit donc que l'intuition seule n'est plus suffisante pour prendre les décisions. Il est indispensable d'avoir recours à une structure quantitative ou modèle pour choisir la meilleure stratégie.

En réponse à ce besoin, un modèle de simulation de l'industrie du béton préfabriqué a été élaboré. Le modèle est suffisamment flexible pour permettre à celui qui est responsable des décisions d'entrevoir différentes hypothèses afin d'en étudier les effets et par conséquent de choisir la meilleure stratégie.

La validité du modèle repose sur une série de tests qui, dans tous les cas, conformément aux critères établis. Le modèle est capable :

- de retracer des données historiques,
- de réagir d'une façon tout à fait plausible en présence de différents problèmes,
- de donner des résultats constants,
- de fournir des résultats tout à fait en rapport avec les connaissances que nous avons de l'industrie,
- de suggérer des prévisions qui concordent avec les prévisions indépendantes sur le futur que l'on trouve dans la littérature.

Nous avons donc entrepris une série d'expériences dont nous avons donné les résultats en fonction d'hypothèses spécifiques. Ces hypothèses portaient soit sur des conditions économiques bien définies, soit sur des stratégies gouvernementales, industrielles ou syndicales à l'égard de la structure, du fonctionnement ou de la performance de l'industrie de la construction en béton préfabriqué.

D'après ces expériences, on peut en venir à un certain nombre de conclusions :

1. La performance de l'industrie du béton préfabriqué semble être dépendante de l'utilisation de ses usines. Il s'ensuit que des prévisions adéquates de la demande et de la planification des usines de production sont d'une extrême importance.
2. Si l'utilisation des usines de béton préfabriqué est stable et maintenue à un niveau maximum, la structure de l'industrie et l'environnement économique dans lequel elle fonctionne, offriront un contexte qui permettra à l'industrie du béton préfabriqué de se développer et d'acquérir une portion de plus en plus grande du marché de la construction. Nous avons observé cette expansion dans un certain nombre de situations envisagées par nos diverses hypothèses. Les stratégies restrictives des syndicats, une organisation industrielle menant à un rendement non optimal, des conditions du marché adverses diminuent le taux de développement de l'expansion industrielle sans toutefois l'arrêter complètement.
3. Une fois que les systèmes de construction en béton préfabriqué (par opposition aux composants en béton préfabriqués) auront reçu l'approbation des architectes du fait de leur qualité et de leur performance économique, ils constitueront la production prédominante de l'industrie du béton préfabriqué.
4. Même dans les cas où de très grandes économies pourraient être réalisées grâce à la préfabrication du logement de luxe, le logement économique semble dominer le marché des systèmes de construction en béton préfabriqué. Il est possible de comprendre ce paradoxe si l'on tient compte du fait que l'industrie du béton préfabriqué alimente le marché du logement multi-familial, constitué presque entièrement par le marché du logement économique.
5. Au fur et à mesure que la production de l'usine augmente dans le temps, il est possible de faire des économies d'échelle sur cer-

Références :

1. *Precast Concrete Institute, The Past Year in PCI, Chicago, Ill. The PCI, 1er août 1971.*
 2. Rosen, R. H., "Industrialized Housing", Sub-committee on Urban Affairs of the Joint Economic Committee of the U.S. Congress, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, avril 1969, p. 337.
 3. *Prestressed Concrete Institute, Directory of Precast Prestressed Concrete Producers as Known to the Prestressed Concrete Institute, Chicago, Ill., The PCI, février 1971.*
 4. Forrester, J. W., *Industrial Dynamics*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press.
 5. Forrester, J. W., *Principles of Systems*, Cambridge, Mass., Wright-Allen Press, 1971.
 6. Meadows, D. L., *Dynamics of Commodity Production Cycles*, Cambridge, Mass., Wright-Allen Press, 1970.
 7. Weymar, H. J., *The Dynamics of the World Cocoa Market*, Cambridge, Mass., The M.I.T. Press, 1968.
 8. Frondistou-Yannas, S. A., *Precast Concrete Industry: a Simulation of its Operation and Potentials*, thèse de doctorat, Department of Civil Engineering, M.I.T., 1973.
- tains éléments du coût. Il en résulte un accroissement de l'importance relative des éléments du coût qui ne sont pas affectés par les économies d'échelle. Par conséquent,
- a. des efforts délibérés pour diminuer le coût des opérations qui ne sont pas sujettes à des économies d'échelle pourraient devenir de plus en plus efficaces avec le temps. Le coût de la main-d'œuvre sur chantier, par exemple, peut être abaissé grâce à des études qui mènent à des méthodes de montage et de jointoiement plus rapides;
 - b. tout essai envisagé pour diminuer le coût des opérations qui sont sujettes à des économies d'échelle aurait un effet relativement moins dramatique, au fur et à mesure que le temps progresse et que l'industrie se développe. Les prêts avantageux offerts par les gouvernements qui essaient de diminuer le coût du capital, par exemple, ont un effet relativement peu significatif pour l'industrie du béton préfabriqué. De même, l'oscillation de la demande dans certains marchés de l'industrie vers le milieu des années 70 n'aura pas un effet dramatique sur l'industrie du béton préfabriqué, car une telle oscillation affectera principalement le coût du capital — élément, qui, étant sujet à des économies d'échelle constituera à cette époque une petite fraction du coût total.
6. Il semble qu'une politique gouvernementale qui offre des prêts avantageux à l'industrie favorise le logement luxueux, puisque le capital nécessaire est relativement important pour ce type de logement et que par conséquent une diminution des coûts de ce capital a un plus grand effet sur ce secteur de l'industrie du logement.
 7. Si l'on présume que l'industrie préfabrique uniquement la structure et l'enveloppe et non pas des composants finis ou des systèmes tout entiers, il est peu probable que les économies seraient suffisantes pour accroître le marché du logement économique même vers 1985.
 8. L'industrie tirera de grands profits lorsqu'elle passera à la préfabrication de composants finis ou de systèmes tout entiers. À condition, bien entendu, que l'utilisation des usines de béton préfabriqué soit stable et maximum, on pourra envisager encore d'autres économies. Par conséquent, un tel changement serait une façon attrayante d'accroître la demande pour le logement économique. Une stratégie qui envisagerait de préfabriquer un plus grand pourcentage de la construction, verrait l'ensemble de ses revenus s'accroître, même dans l'éventualité que la superficie de béton vendu diminue temporairement. Ce phénomène serait dû au fait que l'industrie serait responsable de la vente d'une plus grande partie de l'ensemble de la construction.
 9. Si l'on suppose que le niveau de performance (c'est-à-dire le coût et la qualité) est une fonction sigmoïde du temps, les fonds alloués à la recherche pour promouvoir soit la performance économique soit la qualité du produit auraient un effet plus dramatique, s'ils étaient alloués bien avant que le produit atteigne sa maturité. La meilleure stratégie dépendra par conséquent du moment où les fonds seront alloués. Suivant l'époque choisie, l'allocation des fonds de recherche pourra accroître au maximum l'ensemble des revenus de l'industrie.
 10. Il semble que les augmentations des salaires de la main-d'œuvre en usine (qui deviendraient comparables aux salaires sur chantier) à une époque où l'industrie est bien consolidée et capable de maintenir un taux d'utilisation des usines maximum et constant, peuvent entraîner une diminution de la demande pour les produits en béton préfabriqué sans toutefois arrêter l'expansion de l'industrie.
 11. Plus la construction en béton préfabriqué devient concurrentielle, plus l'industrie du béton conventionnelle devra avoir recours à la mécanisation afin de réduire ses coûts. Dans ce cas alors, ce sont les consommateurs qui bénéficieront de la concurrence.