

UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Constructions Civiles et Industrielles

CALCUL INTELLIGENT DES STRUCTURES

APPROCHE ORIENTEE OBJET

Par

Badreddine MASKRI

Devant le jury composé de :

M. BENZAIBI	Maître de Conférences, U.S.T.S.D, Blida	Président
M. HAMMOUTENE	Professeur, E.N.P, Alger	Examineur
M. ABED	Professeur, U.S.T.S.D, Blida	Examineur
A. ATTAR	Maître de Conférences, U.S.T.S.D, Blida	Rapporteur
M.A. MOHAMED CHERIF	Président Directeur Général, CTC Centre, Alger	Invité

Blida, Décembre 2006

RÉSUMÉ

Le calcul dynamique des structures par l'usage d'outils de simulation peut s'avérer laborieux. En effet, dans la phase préliminaire d'évaluation du comportement sismique d'un bâtiment, on modifie plusieurs fois la conception avant d'arriver au modèle qui réponde aux critères requis par le règlement sismique en vigueur.

Dans cette étude, nous proposons de substituer cette démarche souvent coûteuse, par une modélisation plus simplifiée reposant sur les concepts de programmation objets. Ces concepts consistent à modéliser le système étudié par des entités informatique regroupant les principales caractéristiques du domaine considéré. Ainsi, nous identifions le bâtiment par un objet défini par ses caractéristiques géométriques et intégrant les réponses sismiques sous forme de modèles empiriques.

Ces modèles étant établis sur la base de la théorie des plans d'expériences, technique qui permet d'adopter une démarche formelle dans la définition des essais à effectuer et d'apprécier la confiance à accorder aux résultats obtenus : une campagne de simulations a permis d'étudier l'influence d'un large ensemble de paramètres sur la période fondamentale, et par conséquent sur les efforts engendrés par l'action sismique.

Mots-clefs : dynamique des structures, comportement sismique des bâtiments, réponse sismique, période fondamentale, approche orientée objet, théorie des plans d'expériences.

ABSTRACT

Dynamic analysis of structures by the use of numeric tools can be laborious. In fact, in the preliminary phase of seismic evaluation of a building, one modify several times the conception, before achieving the model respecting criteria required by the seismic code.

In this study, we propose to substitute this procedure, often expensive, by a more simplified modelling based on object programming concepts. These concepts consist to model the system by entities including the main parameters of the studied field. Thus, we identified the building by an object defined by its geometric features and integrating seismic responses as empirical models.

These models are established based on the experimental design theory, methodology that adopt a formal procedure in the test definition and assess reliability of experimental results: a serial of numerical simulations has allowed to study the effect of a large set of parameters on the natural period and therefore on the efforts generated by seismic loading.

Key- words: Structural dynamics, seismic behaviour of building, seismic-response, natural period, oriented-programming, experimented design theory.

ملخص

الحساب الحركي للبنىات بإستعمال الألات الأتحاكي غالبا ما يكون شاق ، في المرحلة التمهيدية يقتضي تولد عدة أنماط التي تخضع إلى مجموعة من التمثيل قبل الوصول إلى الإدراك الذي يتضمن المعايير المسخرة من طرف القوانين السارية المفعول.

في هذه الدراسة، نقترح تعويض هذا المسار الذي هو غالبا مكلف، بتمثيل مبسط يعتمد على المفاهيم – برمجة الوحدة- هذه المفاهيم تستهدف إلى تشكيل الجهاز المدروس بواسطة الكيانات المعلوماتية التي تجمع المميزات الأساسية المرتبطة بالعناصر الملازمة للمجال المعترف. كذلك، نعرف البناية بمؤشر محدد بواسطة خاصياته الهندسية و إدماج الأجوبة الزلزالية بشكل الأنماط التجريبية.

هذه الأنماط أنجزت بواسطة قاعدة نظرية مخططات التجارب، تقنية التي تسمح بتكيف مسار أصلي : تعين التجربات للإنجاز و بتقويم الثقة التي تميثق من النتائج المحصلة : ولقد أنجزنا حملة خاصة بالتمثيلات العددية التي تفتح لنا مجالاً في إطار دراسة تأثير مجموعة من المعالم حول المدة الأساسية و في التالي بالجهود النبتقة من الحركة الزلزالية قصد تثبيت بهذه الكيفية علاقات تستهدف تحديدها.

كلمات مفاتيح : حركية البناية، سلوك الزلزالية للبنىات، الجواب الزلزالي، المدة الأساسية، مفهوم برمجة الوحدة، نظرية مخططات التجارب.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon Professeur A. Attar, pour ses orientations précieuses durant tous mes travaux de recherche.

Je tiens aussi à remercier Mr B.Oukaci, Directeur du CTC Centre de Tipasa, pour m'avoir accueilli au sein de sa structure.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil.

J'adresse mes vifs remerciements à tous les membres du jury d'avoir lu avec beaucoup d'intérêt mon travail de thèse.

Enfin, une pensée à ma famille et à toute l'équipe du CTC Centre de Tipasa ainsi que mes amis de la formation post-graduée.

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Magnitude et intensité	13
Figure 1.2	Chargements périodiques	15
Figure 1.3	Chargements apériodiques	16
Figure 1.4	Spectre de réponse	23
Figure 1.5	Géométrie de la structure étudiée	29
Figure 2.1	Elément poutre en objet	34
Figure 2.2	Exemple de base de données objet passive	41
Figure 2.3	Exemple de base de données objet active	42
Figure 3.1	Géométrie de structure étudiée	53
Figure 4.1	Effet d'un facteur influent et non influent	61
Figure 4.2	Réponses expérimentales et valeurs prédites pour la période fondamentale T	62
Figure 4.3	Réponses expérimentales en fonction des valeurs prédites par le modèle pour la période fondamentale T	63
Figure 4.4	Valeurs données par le RPA en fonction de celle prédites par le modèle T	64
Figure 4.5	Corrélation entre les déplacements suivant les deux directions X et Y	64
Figure 4.6	Corrélation entre les déplacements suivant x et la période fondamentale T	65
Figure 4.7	Les réponses expérimentales en fonction des valeurs prédites par le Modèle pour l'effort normal maximal N_{max}	66
Figure 4.8	Corrélation entre l'effort normal maximal et le moment correspondant	67
Figure 4.9	Corrélation entre le moment fléchissant maximal et l'effort normal correspondant	67

Figure 4.10	Corrélation entre le moment fléchissant maximal et l'effort normal maximal	68
Figure 4.11	Corrélation entre l'effort tranchant à la base suivant les deux directions X et Y	68
Figure 4.12	Corrélation entre l'effort tranchant à la base et l'effort normal maximal	69
Figure 4.13	Les réponses expérimentales en fonction des valeurs prédites par le modèle pour le moment dans les poutres	70
Figure 4.14	Corrélation entre le moment n travée et le moment en appuis dans les poutres porteuses	71
Figure 4.15	Corrélation entre le moment n travée et le moment en appuis dans les poutres secondaires	71
Figure 4.16	Corrélation entre les moments en travée et les moments en appuis dans les poutres porteuses et secondaires	72
Tableau 1.1	Paramètres dynamiques et sismiques	30
Tableau 1.2	Résultats dynamiques	30
Tableau 1.3	Résultats sismiques (déplacements)	31
Tableau 1.4	Efforts engendrés par la combinaison (G+Q+E)	31
Tableau 3.1	Ensemble des facteurs retenus	54
Tableau 3.2	Plan d'expérience des facteurs retenus et leurs niveaux	56
Tableau 4.1	Facteurs retenus	60
Tableau 4.2	Niveau de signification des facteurs influents T	62
Tableau 4.3	Niveau de signification des facteurs influents N_{max}	65
Tableau 4.4	Niveau de signification des facteurs influents M_f	69
Tableau 4.5	Les caractéristiques géométriques pour les dix bâtiments	72
Tableau 4.6	Validation de la période, l'effort normal maximal et le moment fléchissant calculées par logiciel et le modèle utilisé	73

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	
REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	
INTRODUCTION	10
1. PRATIQUE DU CALCUL DYNAMIQUE DES STRUCTURES	12
1.1 Introduction	12
1.2 L'action sismique	12
1.3 Paramètres dynamiques	14
1.4 Application	28
1.5 Conclusion	31
2. CONCEPTS DE LA PROGRAMMATION ORIENTEE OBJET	33
2.1 Introduction	33
2.2 concepts de modélisation_	33
2.6 Application du concept d'objet à la modélisation des bâtiments	42
2.7 Conclusion	43
3. MODÉLISATION DE LA RÉPONSE SISMIQUE PAR LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPERIENCES	44
3.1 Introduction	44
3.2 Méthode des plans d'expériences	44
3.3 Base des plans d'expériences	49
3.4 Proposition d'un modèle pour la période fondamentale : cas des bâtiments de forme rectangulaire	52
3.5 Détermination du plan	55
3.6 Conclusion	56
4. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	58

4.1 Introduction	58
4.2 Analyse des résultats du plan d'expériences	58
4.3 Conclusion	73
CONCLUSION	75
APPENDICE	77
A. Rappels théorie des plans d'expériences	77
B- Plan d'expériences choisis et ensemble des résultats	99
REFERENCES	109

INTRODUCTION

L'utilisation des outils de simulations devient de plus en plus commune dans le domaine du Génie Civil. En effet, le calcul automatique des structures est utilisé de façon routinière dans l'évaluation des projets, générant ainsi un stockage important d'informations utiles à l'ingénieur et qu'il pourrait utiliser de façon efficace dans l'établissement de nouveaux projets. Il est donc important de pouvoir modéliser ces informations et de les structurer de façon intelligente.

En fait, le développement des techniques de modélisation par l'utilisation de l'approche orientée objets offre une souplesse dans la représentation de la connaissance et définissant ainsi des bibliothèques associées à des modèles d'objets intelligents réutilisables dans d'autres applications, de conception similaire « Knowledge based systems » [1-5].

Dans notre étude, on s'intéresse à la modélisation des bâtiments par l'utilisation du concept d'objets. En effet, pour analyser une structure l'ingénieur utilise des logiciels aux éléments finis nécessitant la génération de modèles sur lesquels il effectue une série de simulations pour vérifier son adéquation avant de procéder à son dimensionnement. Cette procédure est souvent laborieuse, il serait donc très utile de développer une méthode qui permettrait d'effectuer une évaluation rapide de la conception sans avoir recours à la simulation numérique dans la phase préliminaire de l'évaluation du projet. Les données de la structure analysée (efforts, ferrailages, etc...) seraient ainsi estimées induisant une réduction significative dans le temps de calcul.

Pour atteindre ce but, la démarche s'est articulée autour de quatre chapitres :

- Au chapitre I, nous avons passé en revue les principes fondamentaux de l'analyse sismique des structures. Un exemple d'application est utilisé pour définir les paramètres nécessaires à l'évaluation de l'adéquation du modèle ainsi que les réponses sismiques requises pour le dimensionnement des éléments porteurs.

- Au chapitre II, nous avons rappelé les principes de la modélisation orientée objets ainsi que son importance dans la représentation des bâtiments pour alléger les procédures d'évaluation.

- Au chapitre III, nous avons établi une procédure numérique basée sur la théorie des plans d'expériences pour déterminer les opérations d'évaluation des réponses sismiques en fonction des caractéristiques géométriques du bâtiment.

- Enfin, au chapitre IV on présente l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

CHAPITRE 1

PRATIQUE DU CALCUL DYNAMIQUE DES STRUCTURES

1.1 Introduction

La construction parasismique est la seule prévention en zone sismique, c'est dire tout l'art de construire en respectant un certain nombre de préconisations règlementaires pouvant avoir une incidence sur le comportement du bâtiment.

En effet, si la conception considérée ne répond pas à une de ces règles, on ajuste les paramètres géométriques de la structure à savoir les poteaux, les poutres et les voiles (dimension, nombre et position) jusqu'à l'obtention d'un modèle adéquat répondant aux critères du règlement en vigueur.

Dans ce chapitre nous allons rappeler les notions de base de l'analyse sismique des structures.

1.2 L'action sismique

Le séisme est le résultat de la libération soudaine d'une quantité d'énergie de l'intérieur de la croûte terrestre. Il se manifeste par un jeu de failles et par une vibration violente du sol due à la propagation d'ondes élastiques dans toutes les directions à partir de son foyer (région de la faille d'où partent les ondes sismiques). Pour les séismes de forte magnitude, la quantité d'énergie est telle que la rupture le long de la faille apparaît en surface.

Les ondes de compression P et de cisaillement S génèrent la vibration des bâtiments à des fréquences pouvant aller jusqu'à 30 Hertz. Il est à noter que les vibrations à hautes fréquences (supérieures à 1 Hertz) affectent les bâtiments peu élevés alors que les fréquences basses (inférieures à 1 Hertz) ont plus d'effet sur les bâtiments élevés [6, 7].

L'étendue de la zone touchée par le séisme dépend de plusieurs facteurs, on cite :

1.2.1 La magnitude et l'intensité

La magnitude est la mesure de l'énergie libérée par le séisme. Elle est fonction de la longueur de la faille et est donnée par la mesure de l'amplitude maximale enregistrée par les sismographes à 100 Km de l'épicentre (Point de la surface terrestre, à la verticale du foyer, où l'intensité du séisme est la plus importante). Sur l'échelle de Richter, on distingue neuf degrés de magnitude : augmenter la magnitude d'un degré revient à multiplier l'énergie libérée par 30.

L'intensité est la mesure des effets et dommages du séisme en un lieu donné. Pour un séisme de magnitude donnée, elle est maximale à l'aplomb de la faille (intensité épiscopentrale) et décroît avec la distance (sauf effets de site, sur terrain sédimentaire par exemple). Elle est d'autant plus importante que le foyer est plus superficiel. Sur l'échelle MSK, on distingue 12 degrés d'intensité [6]:

- degré 1 : séisme non perceptible,
- degré 5 : seuil d'affolement des populations avec réveil des dormeurs et faibles dommages,
- degré 12 : changement total du paysage.

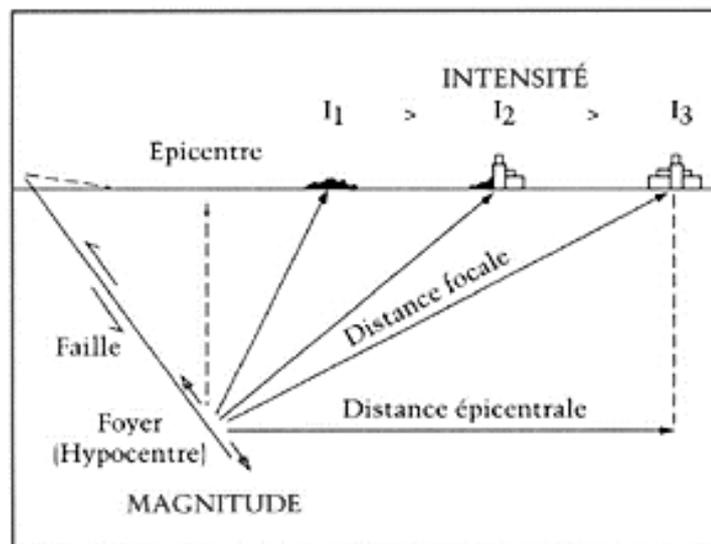


Figure 1.1 : Magnitude et intensité d'un séisme [6]

1.2.2 La fréquence et la durée des vibrations

Engendrées par l'énergie libérée, elles ont une incidence fondamentale sur les effets en surface. Ce sont les vibrations dans la gamme de 0,1 à 2 s de période qui affectent le plus les bâtiments courants [8].

Remarque

Les séismes ne sont similaires :

- ni par leurs effets, dépendants de la distance séparant le site du foyer, la magnitude, la durée, le contenu en fréquence, le milieu géologique traversé et de la qualité du bâti,
- ni par leurs causes, dépendants du mouvement des plaques tectoniques.

1.3 Paramètres dynamiques

Le calcul dynamique suppose la détermination de la réponse des structures à la sollicitation sismique par la prise en compte des forces d'inertie mises en jeu ; l'état de contraintes à tout instant en découle. Lorsque une structure se trouve soumise à une action sismique, elle effectue tout d'abord, tant que dure le séisme, une série d'oscillations forcées régies par des lois complexes, il leur succède, dès que le séisme a pris fin, des vibrations libres qui obéissent à des lois plus simples et qui finissent par s'amortir plus ou moins rapidement.

Dans ce qui suit, nous allons établir la formulation mathématique de l'analyse dynamique des structures [8-13].

1.3.1 Types de chargements donnés

Pratiquement n'importe quelle structure est susceptible de subir pendant sa durée de vie un chargement dynamique sous une forme ou une autre. D'un point de vue analytique, on peut subdiviser les chargements donnés en deux grandes catégories à savoir :

A. Chargements périodiques

Ce type de sollicitation, est constitué de charges répétitives qui conservent leur forme dans le temps sur un grand nombre de cycle de chargement. La figure (1.2) illustre la forme du chargement et des exemples où elles sont susceptibles de se produire.

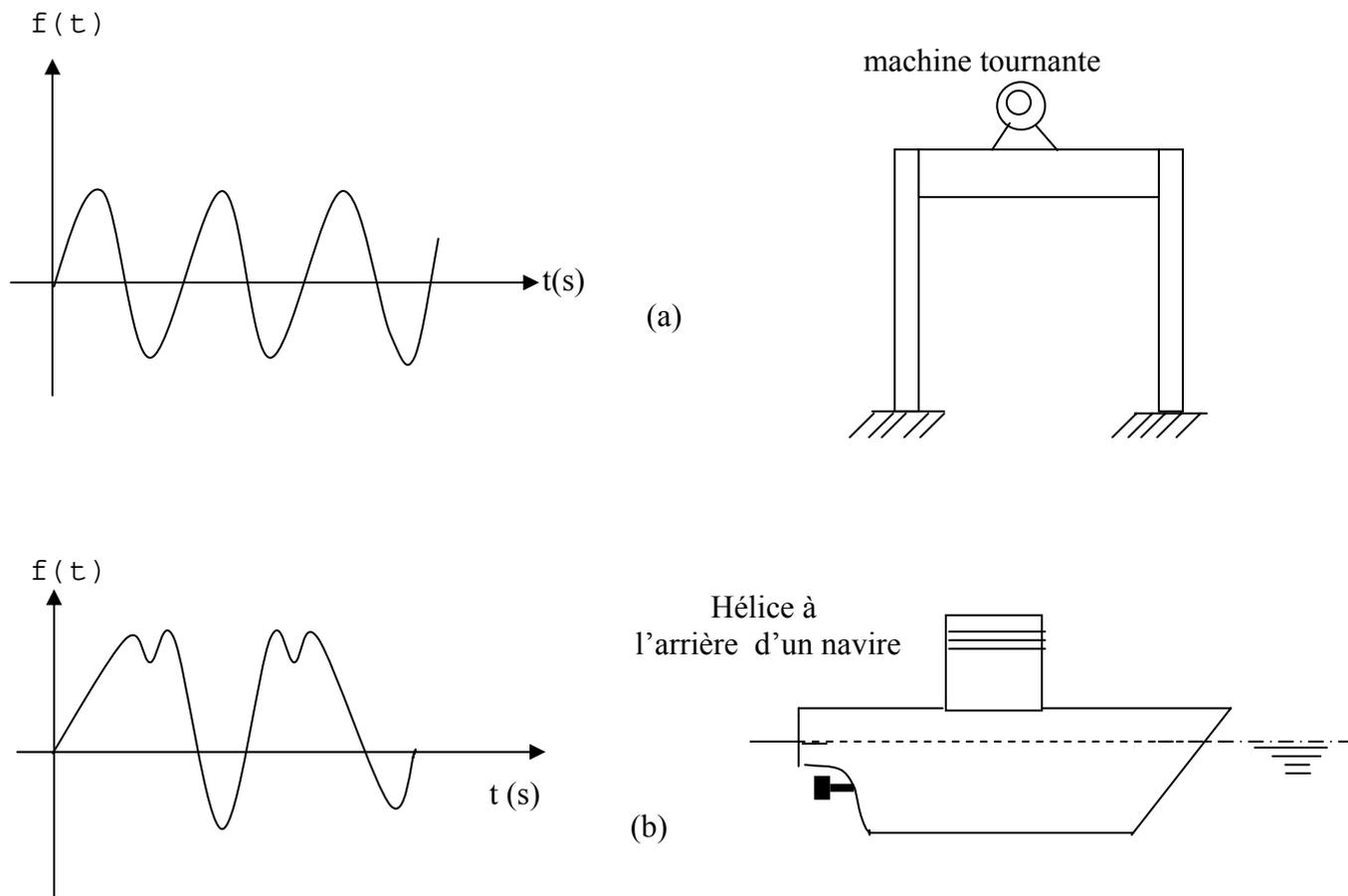


Figure 1.2 : Chargements périodiques [10]

B. Chargements apériodiques

Les chargements apériodiques sont des impulsions de courte durée telles que les explosions ou des chargements de longue durée et de forme quelconque, comme les séismes. La figure (1.3) illustre des cas de chargements apériodiques.

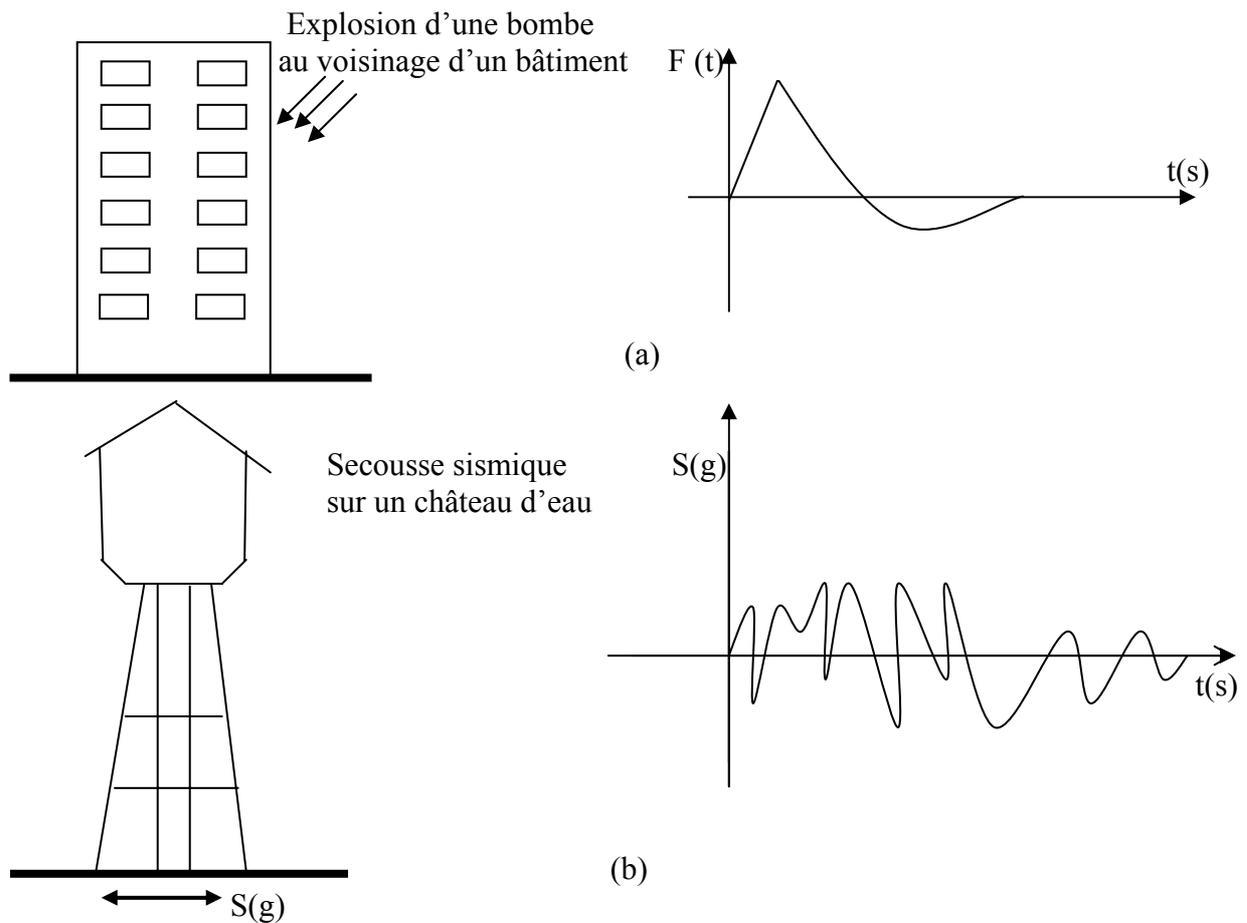


Figure 1.3 : Chargements apériodiques [10]

1.3.2 Réponse d'un oscillateur

Pour une meilleure évaluation de l'influence du mouvement sismique, l'application aux structures des méthodes de la mécanique vibratoire a permis de déterminer la réponse d'une structure considérée comme un oscillateur simple amorti à partir d'un accélérogramme connu. La connaissance de cette réponse permet de mettre au point des méthodes spectrales, qui sont à la base des règlements parasismiques actuels.

Quel que soit le problème à résoudre, il est indispensable de connaître les vibrations naturelles de la structure. Dans le cas des vibrations libres, on ne se préoccupe pas des causes ayant entraîné la structure hors de sa position d'équilibre, mais on propose d'examiner le comportement de celle-ci une fois qu'elle est livrée à elle-même et qu'elle

demeure en présence des forces d'inertie, des forces de rappels et éventuellement des forces d'amortissement.

La modélisation est une phase essentielle pour l'étude de la réponse d'une structure à un chargement de type dynamique. Elle consiste à ramener le problème réel à un problème mathématique régit par un système d'équations d'équilibre. La formulation du problème nécessite souvent une bonne discrétisation et une bonne précision dans l'évaluation des rigidités et la restitution de la masse de la structure d'une manière correcte. Généralement en béton armé, le calcul des masses peut être mené avec une bonne précision par contre, celui des raideurs est souvent approché, contrairement à la construction métallique soudée où le calcul des raideurs et des masses est plus précis.

1.3.2.1 Notion de degrés de liberté (d.d.l)

On appelle degré de liberté le nombre de coordonnées indépendantes nécessaires pour décrire le mouvement de la structure en tout point sous sollicitation et représenter les effets des forces d'inertie qui interviennent lors du mouvement. Le degré de liberté peut être aussi défini comme étant le nombre de mouvements différents et autonomes selon lequel le système peut vibrer.

1.3.2.2 Méthode de discrétisation

Comme la masse d'une structure réelle est toujours répartie de manière continue, il est donc évident que pour représenter les efforts d'inertie, il faudrait prendre en considération autant de degré de liberté que de points massiques de la structure, donc une infinité dans un système à masse continue. On procède alors à une discrétisation pour ramener le nombre de degré de liberté de l'infini à un nombre fini, en concentrant la masse en un certain nombre de points discrets pour les quels, il faut déterminer les déplacements $U(t)$ et les accélérations $\ddot{U}(t)$ engendrée par la sollicitation dynamique. On distingue plusieurs méthodes de discrétisation :

A. Méthode de concentration de masses

Cette méthode est utilisée pour le traitement de certaines structures dont la masse est effectivement concentrée en grandes proportions en certains points, comme les structures en portiques et les ponts. On distingue deux types de structures :

A.1 Structures symétriques

Dans les structures symétriques par rapport à deux axes perpendiculaires, aussi bien du point de vue des raideurs que des masses, le modèle peut être ramené à un modèle plan qui doit satisfaire les hypothèses de calcul suivantes :

- les masses sont supposées être concentrées au niveau des planchers,
- les masses sont activées dans une seule direction horizontale,
- les planchers sont infiniment rigides dans leurs plans à l'effort latéral,
- le modèle est parfaitement encasté à sa base.

A.2 Structures non symétriques

Les structures non symétriques, soit du point de vue des raideurs ou des masses, sont en général représentées par un modèle tridimensionnel encasté à sa base dont les masses sont supposées être concentrées au niveau des planchers et sont activées par trois degrés de liberté. Si le déplacement principal s'effectue dans un plan, un autre déplacement est possible dans le plan perpendiculaire dû à la torsion du bâtiment.

B. Méthode des éléments finis

Cette méthode consiste à subdiviser la structure en petits éléments finis de géométrie simple de manière à approcher le mieux la géométrie réelle de la structure tout en respectant les conditions suivantes :

- l'assemblage de tous les éléments doit former une géométrie plus proche possible de la réalité,
- les vides et les recouvrements entre les éléments ne sont pas tolérés,

- les points nodaux de tous les éléments doivent coïncider avec les points d'application des charges concentrées,
- assurer une continuité entre les éléments.

1.3.3 Analyse par accélérogrammes

Pour faire une analyse par accélérogramme, on utilise la méthode d'analyse modale dont l'expression est donnée par :

$$[m] \{\ddot{x}\} + [c] \{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

avec

$$\{F(t)\} = [m]\{\Gamma\} \ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

$[m]$: matrice de masse globale (diagonale dans le cas d'une modélisation à masses concentrées),

$[c]$: matrice d'amortissement globale,

$[k]$: matrice de rigidité globale,

$\{F(t)\}$: vecteur chargement dynamique,

$\{\Gamma\}$: vecteur d'influence, dont les composantes valent « 1 » si le ddl est dans la direction du séisme, sinon 0,

$\{x\}$, $\{\dot{x}\}$ et $\{\ddot{x}\}$: vecteur déplacements, vitesses et accélérations respectivement,

$\ddot{x}_g(t)$: accélération au sol.

1.3.3.1 Analyse modale

Lors d'une analyse modale le système d'équations du mouvement est couplé. Pour découpler les équations du mouvement, on introduit une transformation linéaire des variables en utilisant la matrice modale A . On passe ainsi des équations différentielles de coordonnées $\{x(t)\}$ à un nouveau système de coordonnées $\{u(t)\}$ tel que :

$$\{x(t)\} = [A] \{u(t)\} \quad (3)$$

On remplace l'équation (3) dans l'équation (1) et on obtient :

$$[m] [A] \{\ddot{u}\} + [c] [A] \{\dot{u}\} + [k] [A] \{u\} = - [m] \{\Gamma\} \ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

On multiplie ensuite l'équation (4) par $[A^{(i)}]^t$ qui représente le $i^{\text{ème}}$ vecteur propre de la matrice modale A. On obtient :

$$[A^{(i)}]^t [m] A \{\ddot{u}\} + [A^{(i)}]^t [c] [A] \{\dot{u}\} + [A^{(i)}]^t [k] [A] \{u\} = - [A^{(i)}]^t [m] \{\Gamma\} \ddot{x}_g(t) \quad (5)$$

Les conditions d'orthogonalité des modes propres pour $i \neq j$ nous donnent :

$$\left\{ \begin{array}{l} [A^{(i)}]^t [m] [A^{(j)}] = m_i \quad \text{si } i = j \\ [A^{(i)}]^t [m] [A^{(j)}] = 0 \quad \text{si } i \neq j \\ \text{et} \\ [A^{(i)}]^t [k] [A^{(j)}] = k_i \quad \text{si } i = j \\ [A^{(i)}]^t [k] [A^{(j)}] = 0 \quad \text{si } i \neq j \end{array} \right. \quad (6)$$

En faisant l'hypothèse de Rayleigh pour l'amortissement, les relations d'orthogonalité précédentes sont étendues à la matrice d'amortissement C :

$$\left\{ \begin{array}{l} [A^{(i)}]^t [c] [A^{(j)}] = C_i \quad \text{si } i = j \\ [A^{(i)}]^t [c] [A^{(j)}] = 0 \quad \text{si } i \neq j \end{array} \right. \quad (7)$$

On obtient alors :

$$M_i \ddot{u}_i + C_i u_i + K_i u_i = -P_i(t) \quad (8)$$

avec

M_i : masse généralisée du mode i ,

C_i : amortissement généralisé du mode i ,

K_i : rigidité généralisée du mode i ,

$P_i(t)$: charge généralisée du mode i .

La solution de l'équation (8) est donnée par l'intégrale de Duhamel, soit :

$$u_i(t) = -\frac{1}{M_i \omega_{di}} \int_0^1 P_i(\tau) e^{-\xi_i(t-\tau)\omega_i} \sin \omega_{di}(t-\tau) d\tau \quad (9)$$

avec

ω_i : pulsation du système non amorti,

ξ_i : coefficient d'amortissement,

$\omega_{di} = \omega_i \sqrt{1-\xi_i^2}$: pseudo-pulsation des oscillations libres amorties,

τ : variable d'intégration.

Dans le cas d'un système à plusieurs ddl, soumis à une accélération cette équation devient :

$$u_i(t) = -\frac{[A^{(i)}][m][\Gamma]}{M_i \omega_{di}} \int_0^1 x_g(\tau) e^{-\xi_i(t-\tau)\omega_i} \sin \omega_{di}(t-\tau) d\tau \quad (10)$$

On pose :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_i = \frac{[A^{(i)}][m][\Gamma]}{M_i} \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{et} \\ S^{(i)}(t) = \int_0^1 x_g(\tau) e^{-\xi_i \omega_i (t-\tau)} \sin \omega_{di}(t-\tau) d\tau \end{array} \right. \quad (12)$$

L'expression de $u_i(t)$ devient alors :

$$u_i(t) = -\frac{\alpha_i}{\omega_{di}} S^{(i)}(t) \quad (13)$$

α_i étant le coefficient de participation modale pour le mode i .

Après avoir calculé les coordonnées normales $u_i(t)$, on peut déterminer les réponses dans les coordonnées réelles et cela en passant par une transformation linéaire :

$$\{x(t)\} = [A] \{u(t)\} \quad (14)$$

La réponse $x_i(t)$ d'un degré de liberté, correspond pour N_m modes de vibration avec $N_m < N$ (N étant le nombre de modes à considérer) à :

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^{N_m} A_i^{(j)} u_j(t) \quad (15)$$

1.3.3.2 Analyse par intégration du système d'équations couplées

La solution de l'équation (1) s'obtient en utilisant un schéma de discrétisation temporelle explicite ou implicite.

Il existe plusieurs algorithmes de résolution de système d'équations différentielles.

On cite :

- la méthode des différences finies,
- la méthode de Newmark et Wilson,
- la méthode de Houbolt.

1.3.4 Analyse modale spectrale

L'analyse modale spectrale est une méthode qui utilise le concept des spectres de réponse sismique élastique pour estimer les réponses maximales en déplacements, vitesses, forces internes, etc... .

Elle s'applique à tout type de structures, ouvrages réguliers ou irréguliers sauf dans le cas de non linéarité mécanique (isolateurs, amortisseurs) ou matérielles. Dans cette méthode, on suppose que la structure a un comportement élastique linéaire. Ce qui nous permet de calculer les modes propres.

Après avoir choisi le modèle et les hypothèses de calcul, on recherche les modes propres, on sélectionne ensuite les modes utiles et enfin on combine ces réponses modales selon différentes règles de combinaison (voir § 1.3.4.3.1).

1.3.4.1 Spectre de réponse

Le spectre de réponse exprime la réponse d'une structure à une accélération du sol (appui), fourni par un accélérogramme. Son but est de caractériser un séisme d'après la réponse de la structure. Par définition, un spectre de réponse en accélération est la courbe donnant l'accélération maximale d'un oscillateur simple à un degré de liberté en fonction des fréquences propres variables (période), caractérisé par une masse M , une raideur K et un facteur d'amortissement C .

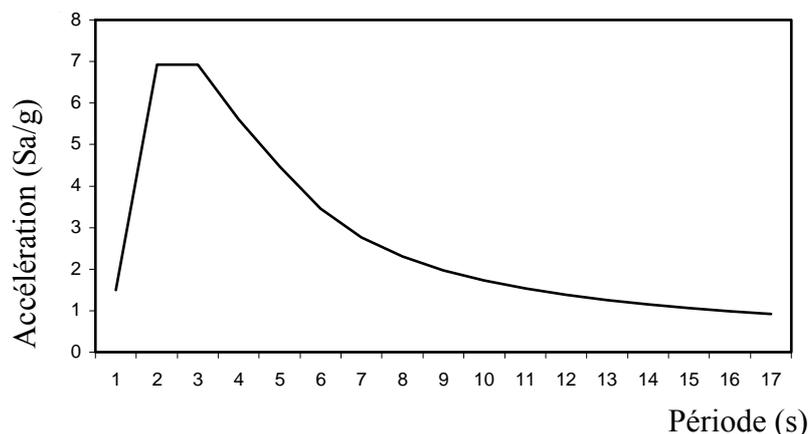


Figure 1.4 : Spectre de réponse [13]

1.3.4.2 Spectre de réponse de calcul

Lorsqu'il s'agit de déterminer le spectre de réponse à prendre en compte dans le calculs des constructions dans un site donné, il est exclu d'utiliser un seul accélérogramme, même si par chance il a été enregistré au voisinage du site. En effet, l'accélérogramme du séisme contre lequel on veut se prémunir n'est pas a priori prévisible. Il convient donc de déterminer un spectre qui sera l'enveloppe d'un ensemble de spectres correspondant à des accélérogrammes enregistrés dans des sites comparables en fonction de la nature du sol. Les spectres de calcul réglementaires sont ensuite modifiés pour tenir compte de l'intensité du séisme et l'importance pour la collectivité de l'ouvrage étudié.

Les règles parasismiques Algériennes [14], et l'eurocode 8 [15] proposent une méthode pour déterminer le spectre de réponse à considérer dans les calculs.

1.3.4.3 Calcul des réponses modales maximales

La réponse maximale en valeur absolue du mode i est donnée par :

$$|u_i(t)|_{\max} = \frac{\alpha_i}{\omega_{di}} |S^{(i)}(t)|_{\max} \quad (16)$$

avec :

$$\alpha_i = \frac{[A^{(i)}]^T [m] \Gamma}{M_i} \quad (17)$$

$\frac{|S^{(i)}(t)|_{\max}}{\omega_{di}}$: la valeur spectrale en déplacement S_d et pour la fréquence ω_i

$|S^{(i)}(t)|_{\max} = S_v^{(i)}$: spectre de pseudo-vitesse relative.

La réponse maximale est donnée par :

$$|u_i(t)|_{\max} = \frac{\alpha_i}{\omega_{di \max}} S_v^{(i)} = \alpha_i S_d^{(i)} \quad (18)$$

La réponse en coordonnées réelles est de la forme :

$$\{x(t)\} = [A]\{u(t)\} \quad (19)$$

La réponse d'un ddl $x_i(t)$ s'obtient pour N_m modes de vibration avec ($N_m < N$) comme suit :

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^{N_m} A_i^{(j)} u_j(t) \quad (20)$$

$x_i^{(j)}$ étant la contribution du mode j au ddl i.

La réponse maximal $x_i^{(j)}_{\max}$ est donnée par :

$$x_i^{(j)}_{\max} = A_{i(j)} u_{j_{\max}} = A_i^{(j)} \alpha_j S_D^{(j)} \quad (21)$$

avec

$S_D^{(j)}$: spectre de déplacement relatif au mode j pour ω_j et ζ_j

On obtient :

$$|x_i^{(j)}_{\max}| = \alpha_j S_D^{(j)} |A_i^{(j)}| \quad (22)$$

La force maximale correspond à :

$$[Q^i_{\max}] = [k][x^i_{\max}] = \omega_i^2 [m] \alpha_i S_D^{(i)} [A^{(i)}] = \alpha_i S_A^{(i)} [m][A^{(i)}] \quad (23)$$

L'effort tranchant à la base pour un ddl par étage pour le mode i est donné par :

$$V^i_{\max} = \sum_{j=1}^N Q^{(i)}_{j_{\max}} = [Q^i_{\max}]^T [I] \quad (24)$$

On remplace dans l'équation (24) $[Q^i_{\max}]$ par sa valeur donnée en (23) et en tenant compte de la valeur du facteur de participation modal α_i , on obtient alors:

$$V^i_{\max} = M_i \alpha_i^2 S^{(i)}_A \quad (25)$$

M_i étant la masse modale pour le mode i.

1.3.4.3.1 Combinaison statique des réponses modales maximales

Pour déterminer la réponse maximale du degré de liberté dynamique, $x_{i \max}$, on ne peut pas additionner directement les réponses modales maximales. Ces valeurs maximales ne se produisent pas au même temps et leur addition donne des résultats excessifs.

En pratique, on doit recourir à une combinaison statistique des réponses modales maximales pour estimer la réponse maximale de chaque degré de liberté. Différentes combinaisons sont utilisées, on cite :

A. Combinaison de la racine carrée de la somme des carrés SRSS (Square Root of the Sum of the Squares)

Cette méthode donne généralement de bons résultats pour des systèmes ayant des fréquences naturelles bien séparées. On a :

$$x_{i \max} = |x_i(t)|_{\max} = \sqrt{|x_i^{(1)}|_{\max}^2 + |x_i^{(2)}|_{\max}^2 + \dots + |x_i^{(N_m)}|_{\max}^2} \quad (26)$$

B. combinaison quadratique complète CQC (Complete Quadratic Combinaison)

Cette combinaison est utilisée dans le cas où le système posséderait des fréquences très rapprochées. Cette méthode est basée sur la théorie des vibrations aléatoires :

$$x_{i \max} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{N_m} x_{i \max}^{(j)} \rho_{jk} x_{i \max}^{(k)}} \quad (27)$$

avec

$x_{i \max}^j$: réponse modale maximale du mode j,

$x_{i \max}^k$: réponse modale maximale du mode k,

ρ_{jk} : coefficient d'inter- corrélation entre les modes j et k.

Si les fréquences sont bien séparées, on converge vers la combinaison SRSS.

1.3.5 Période du mode fondamental

La valeur de la période fondamentale (T) de la structure peut être estimée à partir de formules empiriques ou calculée par des méthodes analytiques ou numériques.

1.3.5.1 Formules données par le RPA

La formule empirique de la période T est donnée par les trois formules suivantes:

$$a / \quad T = C_T h_N^{3/4} \quad (28)$$

avec

h_N : hauteur mesurée en mètre à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau(N),

$$C_T = \begin{cases} 0.075 & \text{pour des portiques tridimensionnels en béton sans remplissage en} \\ & \text{maçonnerie,} \\ 0.050 & \text{pour les autres cas.} \end{cases}$$

$$b / \quad T = 0.09 h_N / \sqrt{D} \quad (29)$$

avec

D : dimension du bâtiment mesurée à sa base dans la direction de calcul considérée.

$$c / \quad T = 2 \sqrt{\delta_N} \quad (\text{Formule de Rayleigh simplifiée}) \quad (30)$$

avec

δ_N : flèche horizontale au sommet du bâtiment, mesurée en mètre, due aux forces gravitaires appliquées horizontalement.

1.3.5.2 Formules données par L'AFPS

L'AFPS 90 [11,13], propose d'évaluer la période du mode fondamental dans la direction de calcul de longueur L_x (en m) par les formules suivantes :

- pour les contreventement par ossature en béton armé (H étant la hauteur de dimensionnement),

$$T = 0.09 \frac{H}{\sqrt{L_x}} \quad (31)$$

- pour les contreventement par voiles ou contreventement mixtes,

$$T = 0.08 \frac{H}{\sqrt{L_x}} \sqrt{\frac{H}{L_x + H}} \quad (32)$$

- pour les ossatures avec remplissage en maçonnerie,

$$T = 0.06 \frac{H}{\sqrt{L_x}} \sqrt{\frac{H}{2L_x + H}} \quad (33)$$

Le règles AFPS limitent supérieurement H_t à 75 m au dessus de la fondation pour les bâtiments réguliers dont la période T (en s) doit répondre à :

$$T \leq \left(\frac{H_t}{30} \right)^{3/4} \quad (34)$$

L'AFPS évalue aussi la période fondamentale par formule suivante :

$$T(s) = 5 \sqrt{\delta_n} \quad (35)$$

avec

δ_n : le déplacement en mètre du sommet du bâtiment placé dans un champ d'accélération horizontale de 1 m s^{-2} .

1.4 Application

Nous avons considéré un bâtiment R+4 à usage d'habitation dont les dimensions sont représentées sur la figure (1.5). Pour nos simulations, nous avons utilisé « Robot Millénium », logiciel de calcul des structures basé sur le concept d'objets [42].

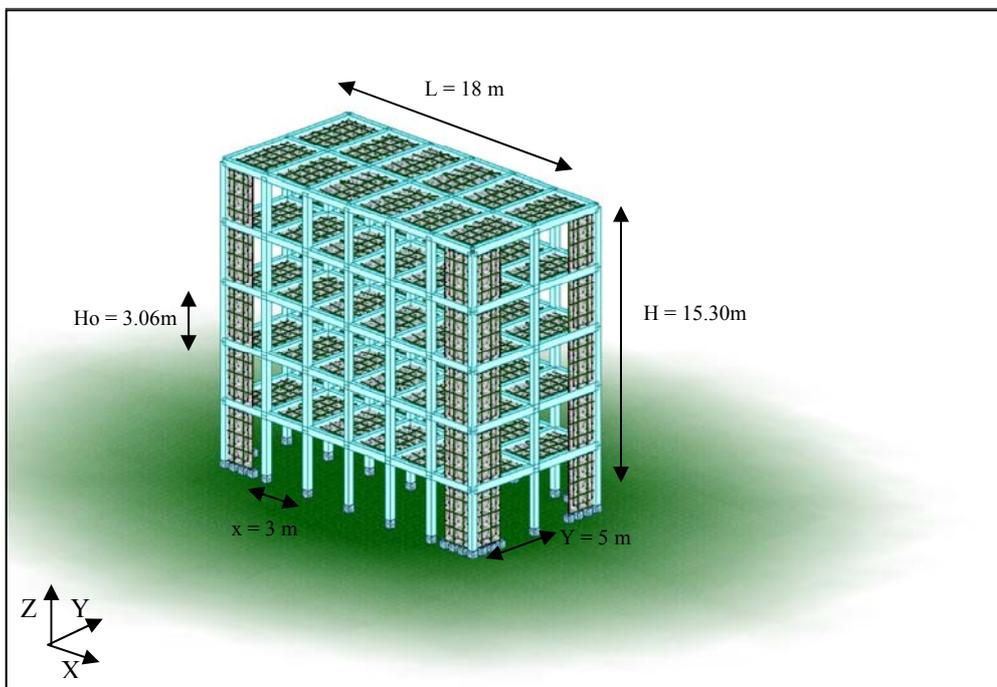


Figure 1.5 : Géométrie de la structure étudiée

Après avoir effectué un certain nombre de modifications sur le modèle initial, nous avons retenu la configuration géométrique suivante :

- dimension des poteaux $35 \times 35 \text{ cm}$,
- dimension des poutres $30 \times 40 \text{ cm}$ (poutres porteuses) et $30 \times 35 \text{ cm}$ (poutres secondaires),

- des voiles de 15 cm d'épaisseur disposés sur les quatre angles du bâtiment.

Ce modèle a été analysé en considérant les paramètres dynamiques et sismiques donnés dans le tableau suivant :

Tableau 1.1 : Les paramètres dynamiques et sismiques

Paramètres dynamiques [14]	Paramètres sismiques [14]
Méthode d'analyse : analyse modale spectrale	Zone : III (forte sismicité)
Coefficient d'amortissement $\xi = 7$	Groupe d'usage : 2 (habitation)
Coefficient de pondération $\beta = 0,2$	Type de sol : S3 (sol meuble)
	Coefficient de comportement $R = 5$
	Facteur de qualité $Q = 1.2$

Le modèle présente une période de 0.37 s (inférieure à celle préconisée par le RPA, ainsi qu'une participation massique supérieure à 90% dans les deux directions horizontales (voir tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Réponse dynamique

Mode	Valeur propre	Fréquence (Hz)	Période (sec)	Pulsation (1/sec)	Masse U_x (%)	Masse U_y (%)
1	290.97	2.71	0.37	17.06	74.17	0.00
2	467.87	3.44	0.29	21.63	74.18	70.59
3	916.83	4.82	0.21	30.28	84.41	70.64
4	1343.87	5.83	0.17	36.66	74.41	80.65
5	1612.98	6.39	0.16	40.16	92.42	82.65
6	1689.97	6.54	0.15	41.11	92.44	90.65

On remarque aussi que déplacements et l'effort tranchant à la base engendrés sont acceptables (voir tableau 1.3)

Tableau 1.3 : Les résultats sismiques (les déplacements)

les déplacements l'excitation sismique	U_x (cm)	U_y (cm)	U_z (cm)
suivant x -x	0.99	0.09	0.13
suivant y -y	0.02	0.60	0.17

Les efforts maximums engendrés par la combinaison G+Q+E (G étant la charge permanente, Q la charge d'exploitation et E l'excitation sismique) et représentés dans le tableau (1.4) sont les valeurs à considérer pour le dimensionnement des éléments porteurs.

Tableau 1.4 : Efforts engendrés par la combinaison (G+Q+E)

Effort Elément		F_x (t)	F_y (t)	F_z (t)	M_x (t.m)	M_y (t.m)	M_z (t.m)
Poteaux 35x35(cm)	MAX	141.12	2.50	6.92	0.08	5.70	7.25
	MIN	1.39	-3.35	-3.22	-0.10	-9.60	-4.44
Poutres 30x40 (cm)	MAX	1.48	0.18	1.65	1.20	4.21	0.19
	MIN	-0.79	-0.09	-4.65	-0.48	-9.62	-0.04
Poutres 30x35(cm)	MAX	5.00	1.24	2.57	0.43	1.61	0.25
	MIN	-0.09	-0.05	-1.03	-0.31	-4.72	-0.02

1.5 Conclusion

Le calcul dynamique des structures peut s'avérer laborieux. En effet, le concepteur se trouve souvent amené à modifier plusieurs fois le modèle avant d'arriver à la conception qui respecte le règlement parasismique en vigueur à savoir :

- la condition sur la période fondamentale,
- la condition sur l'effort tranchant à la base,

- la condition sur les déplacements inter étages.

Il procède alors à l'évaluation des efforts et des déplacements pour pouvoir dimensionner les éléments porteurs.

Il serait donc utile de proposer une méthode qui allège cette procédure à savoir "l'approche orientée objets", décrite dans le chapitre 2.

CHAPITRE 2

CONCEPTS DE LA PROGRAMMATION ORIENTEE OBJET

2.1 Introduction

La programmation orientée objet consiste à modéliser un ensemble d'éléments d'une partie du monde réel (que l'on appelle domaine) en un ensemble d'entités informatiques, appelées objets. Il s'agit de données informatiques regroupant les principales caractéristiques des éléments du domaine considéré. Cette approche est utilisée pour sa souplesse, sa bonne structuration de l'application et pour sa modélisation qui est proche de la réalité [16-18].

Dans ce qui suit, nous allons passer en revue les concepts d'objets [19-26], en s'appuyant sur des exemples.

2.2 Concepts de modélisation

2.2.1 Les classes

Une classe représente un modèle de construction d'un objet. Il s'agit d'une description abstraite en terme de données et de comportements d'une famille d'objets.

Une classe d'objets est constituée d'une partie statique et d'une partie dynamique [19, 20] :

a/ Partie statique : les attributs

Les attributs représentent la description des données propres à chaque classe d'objets. Ceux-ci peuvent être des objets d'autres classes ou des références sur d'autres objets. Pour qualifier les attributs d'une classe, on raisonne en termes de propriétés.

b/ Partie dynamique : les méthodes

Les méthodes représentent l'ensemble des actions, procédures, fonctions ou opérations que l'on peut associer à une classe.

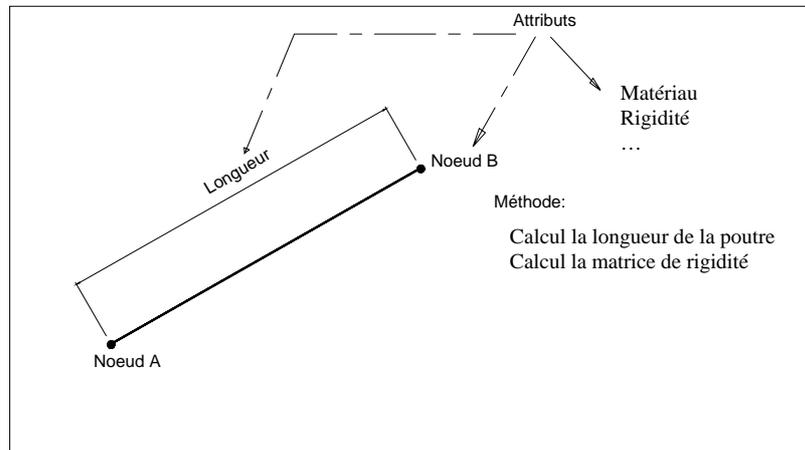
Exemple [17] :

Figure 2.1 : Élément poutre en objet

2.2.1.1 Instances de classes

Une instance de classe est un élément construit selon le modèle de sa classe.

On nommera cet élément "OBJET". L'opération par laquelle une classe produit plusieurs instances est l'instanciation.

Exemple [17] :

<u>Classe</u> Elément barre	<u>Objet :</u> Elément 1	<u>Objet :</u> Elément 2
<u>Attributs :</u> Nombre Matériau Nœud A Nœud B Longueur Rigidité ... <u>Méthode</u> Calcul la longueur Calcul la matrice de rigidité ...	<u>Classe :</u> Elément barre <u>Attributs :</u> Nombre : 1 Matériau : béton Nœud A : nœud 5 Nœud B : nœud 8 Longueur : 10. Matrice rigidité : $\begin{bmatrix} 12 & -12 \\ -12 & 12 \end{bmatrix}$...	<u>Classe :</u> Elément barre <u>Attributs :</u> Nombre : 2 Matériau : béton Nœud A : nœud 8 Nœud B : nœud 9 Longueur : 6. Matrice rigidité : $\begin{bmatrix} 6 & -6 \\ -6 & 6 \end{bmatrix}$...

2.2.2 Concept d'activation

Le seul mode de communication entre objets est l'envoi de messages [21].

2.2.2.1 Les messages

Un message est une requête. L'arrivée d'un message provoque l'exécution d'une méthode d'un objet. Chaque message précise la méthode à appliquer avec éventuellement des paramètres. L'objet destinataire est soit spécifié, soit implicite si un objet appelle une de ses propres méthodes.

2.2.2.2 L'encapsulation

L'encapsulation est le processus qui consiste à empêcher d'accéder aux détails d'un objet qui ne contribuent pas à ses caractéristiques essentielles. Il s'agit de la généralisation de l'abstraction de données.

L'encapsulation consiste à intégrer le code et les données d'une entité au sein d'un objet. Elle empêche également les utilisateurs clients de connaître les détails de son implémentation en ne fournissant qu'une vue externe (correspondant à un masquage d'information). Seule l'interface (ou protocole) d'un objet est visible aux utilisateurs du code.

2.2.2.3 Le polymorphisme

Le polymorphisme permet de définir plusieurs formes pour une méthode commune à une hiérarchie d'objets. C'est à l'exécution que l'on détermine quelle forme appeler suivant la classe de l'objet courant.

Un code qui n'utiliserait pas le polymorphisme pourrait utiliser une instruction à choix multiple suivant la classe des objets rencontrés.

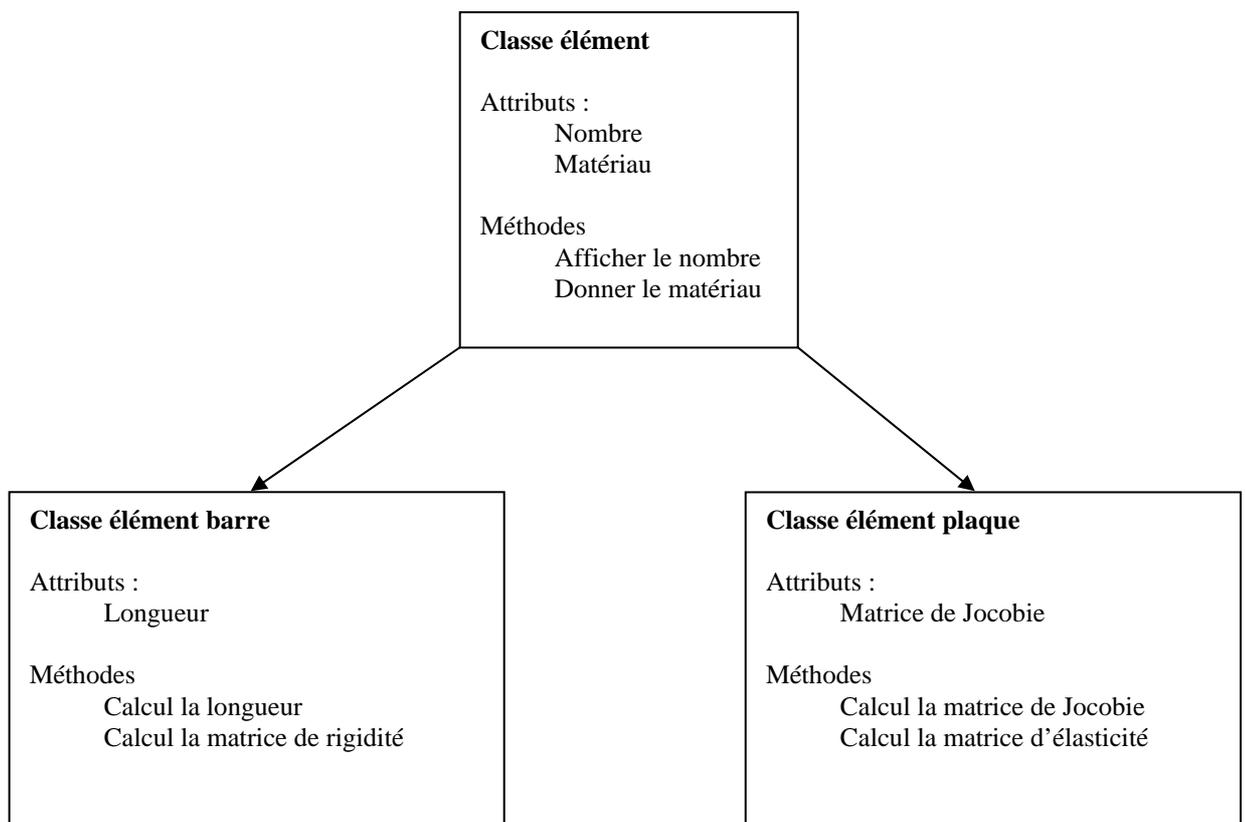
Un tel code serait donc à modifier à chaque ajout ou suppression de classe.

2.2.3 Concept d'héritage

2.2.3.1 Qu'est-ce qu'un héritage ?

L'héritage est un mécanisme destiné à exprimer les similitudes entre classes [22]. Il met en oeuvre les principes de généralisation et de spécialisation en partageant explicitement les attributs et méthodes communs au moyen d'une hiérarchie de classes.

Exemple [17] : Elément Barre et élément plaque



La classe fille hérite des caractéristiques de sa classe mère (attributs et méthodes) mais elle se distingue par ses caractéristiques propres.

2.2.3.2 Les différents types d'héritage

On distingue deux types d'héritage [22] :

- Héritage simple : une classe fille n'a qu'une seule classe mère et elle hérite d'une partie des attributs et méthodes de celle-ci en ayant ses spécifications propres. Cette notion est celle qui est utilisée dans les méthodes objets hiérarchiques.
- Héritage multiple : une classe fille hérite de plusieurs classes mères. Elle hérite d'une partie des attributs et des méthodes de chacune de ses classes mères, en plus de ses spécifications propres. Beaucoup de langages objets ne proposent pas d'héritage multiple.

2.2.4 Méthode de conception par objets

Une approche orientée objets ne se limite pas à un ensemble de nouveaux concepts ; elle propose plutôt une nouvelle manière de penser qui conduit à un nouveau processus de décomposition des problèmes. Cette approche s'oppose à une approche classique qui donne la priorité aux fonctions d'un logiciel plus qu'aux données.

L'expérience montre que, généralement, au cours de l'évolution d'un logiciel, les données manipulées par le logiciel sont plus stables que les traitements qui leur sont associés. L'approche orientée objets donne donc la priorité aux données manipulées par le logiciel. Avec cette approche, les problèmes abordés peuvent être modélisés par une collection d'objets qui prennent chacun une tâche spécifique.

La résolution du problème est conduite par la manière dont interagissent les différents objets.

L'approche orientée objet peut être abordée selon la démarche suivante [23] :

- les principes doivent guider la réalisation, ils donnent "l'esprit" de la démarche. Ils servent de fil conducteur lors de l'analyse, de la conception et de la réalisation d'une application,
- les étapes donnent la suite des actions à entreprendre,
- des conseils servant à guider le concepteur dans l'utilisation des principes et des étapes,

- les erreurs communes doivent être pris comme des "conseils sur ce qu'il ne faut pas faire".

2.2.4.1 Les principes

On considère trois principes essentiels [24] :

a/ Principe de réification

La réification est l'opération essentielle de la notion d'objet par laquelle une entité (chose physique, relation, évènement, situation, idée, loi, etc ...) est représentée sous la forme d'un objet.

Lorsqu'on cherche à modéliser un système, on définit les entités à mettre sous forme d'objet et les classes de notre application.

Si on parle d'une entité en lui attribuant des propriétés ou d'une entité à être manipulée, il faut la réifier, c'est à dire la représenter sous forme d'objet.

b/ Principe d'autonomie

Il faut pouvoir considérer les objets comme des entités, qui s'animent et réagissent de manière autonome. Le principe d'autonomie peut s'appréhender de la manière suivante :

- penser en termes d'objets et seulement ensuite en termes d'opérations à appliquer,
- penser à demander aux objets d'accomplir eux-mêmes leurs actions et non chercher à manipuler directement ces objets par l'intermédiaire de procédures globales.

c/ Principe d'affinage

Programmer par objets c'est l'art de savoir utiliser ce qui a déjà été écrit et ne refaire que la différence nécessaire à la réalisation de l'application.

L'affinage consiste à définir les relations :

- de composition

Les objets se composent d'éléments pour former un tout

- d'héritage

Faire hériter de caractéristiques plus génériques déjà existantes et ne définir que ce qui est nouveau

2.2.4.2 Etapes de la modélisation

La modélisation orientée objet se fait en trois étapes [24, 25] :

a/ Identifier les entités du domaine

Cette étape est la plus importante. Elle s'élabore à partir de la question :

↳ De quoi parle-t-on ? ⇐ en utilisant le principe de réification.

On détermine initialement les classes les plus importantes, puis au fur et à mesure de l'avancée de l'analyse, les classes sont enrichies, distinguées ou fusionnées.

Les classes principales correspondent généralement aux mots et aux concepts principaux du domaine.

D'autre part, lors de l'interview, à partir du vocabulaire qu'emploie le spécialiste, il est facile de traduire les noms communs en objets et les verbes en méthodes.

Cette règle simple peut servir de point de départ pour identifier les entités.

La difficulté réside généralement dans l'obtention des "bonnes" classes. Il existe trois solutions possibles pour répondre à cette difficulté :

- prendre un noyau de classes initiales qui semblent "évidentes" puis au cours de l'analyse ajouter de nouvelles classes, regrouper des classes existantes,
- démarche inverse : Faire la liste exhaustive de toutes les entités du domaine et de toutes les relations envisageables afin d'obtenir un ensemble de travail à partir duquel, par réorganisation et suppression, certaines de ces entités deviendront des classes alors que d'autres disparaîtront,

- une troisième solution traite les classes comme des regroupements de propriétés et de relations. On regroupe les propriétés semblables par un traitement qui ressemble à un mécanisme de classification.

b/ Structurer le domaine

En fait, il faut structurer le domaine par l'analyse des propriétés et des relations. Cette étape consiste à établir le graphe d'héritage et le graphe de composition. On établit donc les relations entre les objets.

c/ Identifier les opérations

Après les aspects statiques, on examine les aspects dynamiques. Cette étape consiste à se poser les questions suivantes :

- ↳ Que peut-on effectuer sur ces objets ? ↵
- ↳ A quoi sait réagir un objet ? ↵

La réponse à la première question correspond aux méthodes, c'est à dire les opérations ou comportement des objets.

La réponse à la deuxième question définit les messages auxquels savent répondre une population d'objets.

La détermination de ces opérations doit se faire en considérant que les messages définissent une sorte de langage d'interaction entre objets.

2.2.5 Bases de données objets

Les programmes orientés objet se défont rarement de leurs objets à la fin d'une exécution. D'habitude, ils construisent et conservent les objets, les réutilisant à chaque nouvelle exécution. Mais où ces objets sont-ils stockés ? où vont-ils lorsque le programme ne s'exécute plus ?

Les bases de données objets sont conçues pour stocker des objets. On distingue deux grandes catégories [26] :

a/ Bases de données objet passives

Elles stockent la structure des objets, mais n'implémentent pas leur comportement en stockant les méthodes dans un fichier externe. Cela signifie qu'on ne peut pas exécuter la méthode d'un objet tant qu'il se trouve dans la base de données. On doit retirer l'objet de la base de données et le placer dans un programme de l'application pour qu'il soit à nouveau opérationnel.

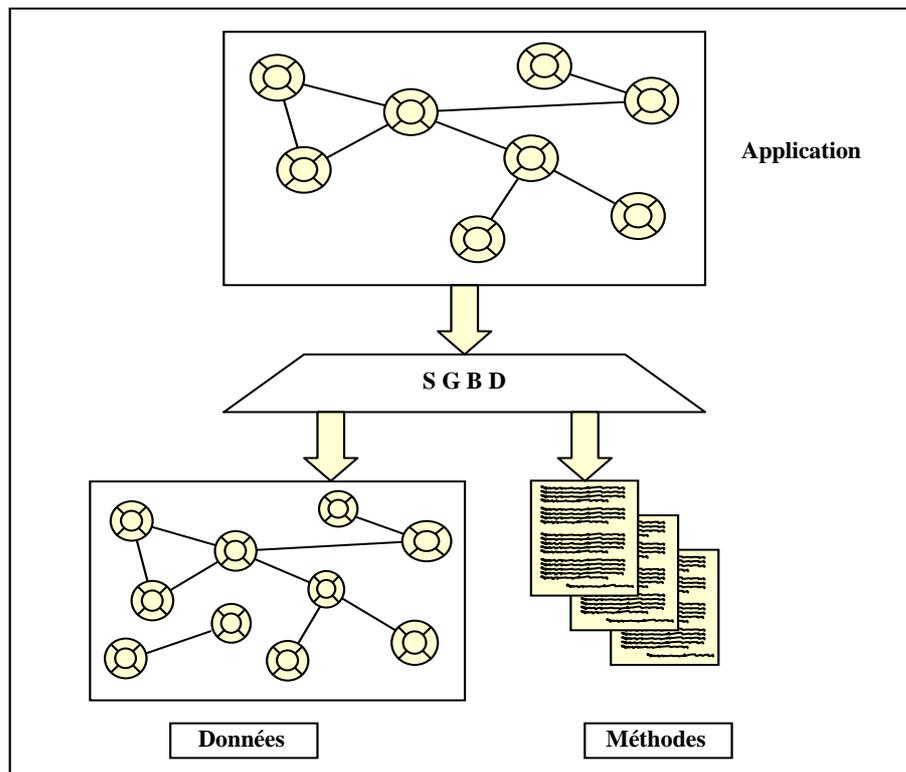


Figure 2.2 : Exemple de base de données objet passive [26]

b/ Bases de données objet actives

Elles permettent aux objets de s'exécuter et d'interagir à l'intérieur même de la base de données. Les systèmes actifs doivent comporter les fonctionnalités d'un langage de programmation complet pour pouvoir exécuter les méthodes à l'intérieur de la base de données. Les bases de données objet actives apportent toute la puissance de la technologie orientée objet à la gestion de l'information stockée.

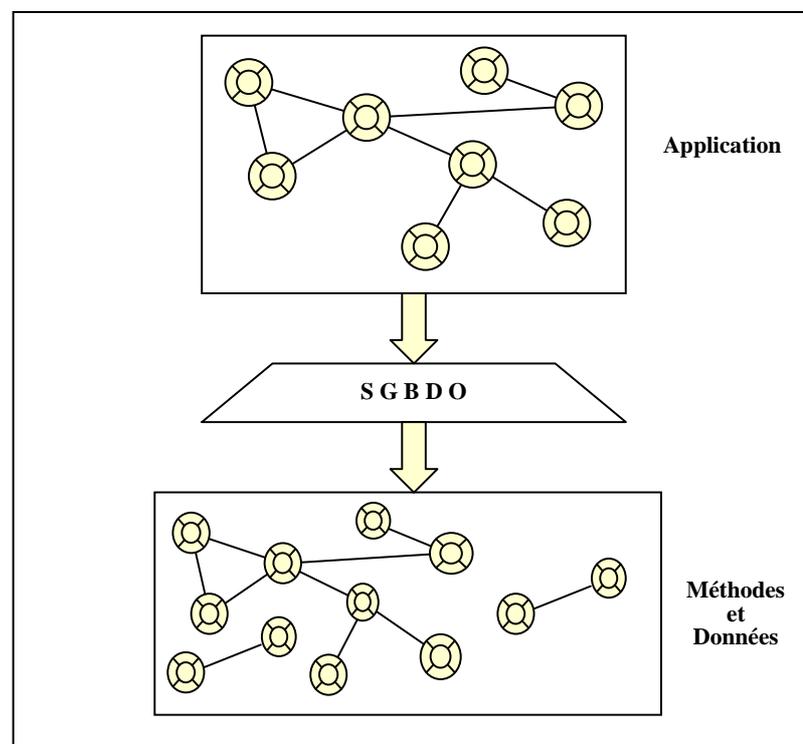


Figure 2.3 : Exemple de base de données objet active [26]

2.3 Application du concept d'objet à la modélisation des bâtiments

Dans notre cas, le bâtiment sera représenté par ses paramètres géométriques. Pour pouvoir quantifier la géométrie, nous allons considérer des bâtiments de forme régulière à savoir, une base rectangulaire avec des entre axes identiques suivant les deux directions horizontales respectivement et une hauteur d'étage constante. Le bâtiment sera complètement identifié par :

- sa hauteur,
- son entre axe suivant les deux directions horizontales,
- le nombre de travées dans les deux directions horizontales.

Ces paramètres, qualifiés d'attributs, permettront de connaître les réponses sismiques (via des opérations préalablement établies) sans avoir à effectuer des simulations.

2.4 Conclusion

L'approche orientée objet permet de générer des représentations informatiques d'entités ayant une existence réelle. Cette technologie ambitionne de changer la manière dont on stocke et dont on recherche l'information.

Nous proposons d'utiliser cette technique de programmation pour la modélisation des structures, en les assimilant à des objets identifiés par leur géométrie et intégrant les opérations de détermination des efforts et déplacements engendrés par des sollicitations sismiques.

Il serait donc utile d'établir les relations (efforts, caractéristiques géométriques). Nous allons utiliser à cet effet la théorie des plans d'expériences décrite dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DE LA RÉPONSE SISMIQUE PAR LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

3.1 Introduction

La période propre d'une structure est un paramètre très important dans le comportement dynamique. Celle-ci peut être évaluée numériquement et dépend principalement des paramètres géométriques de la structure.

On cherche à mettre au point une procédure numérique dans la quelle on fait varier simultanément l'ensemble des paramètres qui peuvent être influents sur le comportement dynamique. C'est dans cette situation que le recours aux plans d'expériences revêt tout son intérêt [27-31].

Dans ce chapitre nous allons rappeler les principes de base de la théorie des plans d'expériences ainsi que son application à notre cas.

3.2 Méthode des plans d'expériences

3.2.1 Définitions

Il est important de bien définir le vocabulaire que nous allons employer [32] :

- Facteur : On appelle le facteur une variable ou un état susceptible d'affecter le système étudié.
- Réponse : La réponse du système étudié est la grandeur que l'on mesure pour connaître l'effet des facteurs sur le système. Elle peut être de type quantitatif ou qualitatif.
- Facteur influent : Un facteur influent est un facteur qui, lorsqu'il est modifié, modifie la réponse du système. Evidemment, un facteur non influent sera un facteur qui n'a aucun effet sur la réponse du système.
- Niveau d'un facteur : Les niveaux d'un facteur indiquent les valeurs que prend le facteur au cours des essais. Le nombre de niveaux d'un facteur représente

donc le nombre de valeurs attribuées au facteur dans le domaine expérimental.

- Nombre de degrés de liberté d'un facteur (ddl) : Le nombre de ddl d'un facteur est donné par :

$$\text{ddl} = \text{nombre de niveaux} - 1$$

- Effet d'un facteur : On appelle effet d'un facteur sur la réponse mesurée y , toute variation de y consécutive à un changement de niveau de ce facteur.
- Interaction : Lorsque l'effet d'un facteur dépend de la valeur prise par un autre facteur, cela se traduit par une interaction (couplage) entre les deux facteurs.
- Nombre de degrés de liberté d'une interaction : Le nombre de ddl d'une interaction entre deux facteurs est le produit des ddl de chacun des deux facteurs.
- Action : On appelle action un facteur ou une interaction entre facteurs.

3.2.2 Principe général de la méthode des plans d'expériences

Lorsqu'on étudie expérimentalement un phénomène physique, on le caractérise par des réponses dont on suit les variations en fonction des divers paramètres supposés influents.

Soit une grandeur Y dépendant de N paramètres (P_1, P_2, \dots, P_n) , parmi lesquels on distingue les paramètres (P_1, P_2, \dots, P_i) considérés comme influents et les paramètres (P_{i+1}, \dots, P_n) non pris en compte. Cette dépendance s'exprime mathématiquement par la relation :

$$Y = \varphi_{\text{th}}(P_1 \dots P_j) \quad (35)$$

La réponse 'vraie', $Y_{\text{exp}} = \varphi_{\text{th}}(P_1 \dots P_n)$, ne sera jamais accessible à l'expérimentateur. Elle ne peut qu'être approchée par Soulier.B [33] :

$$Y_{\text{exp}} = Y_{\text{th}} + E \quad (36)$$

où E représente l'erreur expérimentale ou « bruit », intégrant :

- les erreurs de mesure,
- l'approximation que constitue $\varphi_{\text{th}}(P_1, \dots, P_i)$,
- la non prise en compte de certains facteurs.

En outre, on écrit en général que φ_{th} est une fonction polynomiale. Le problème consiste à déterminer cette fonction en utilisant les techniques de régression linéaire multiple et en modélisant la surface de réponse du phénomène physique étudié. La régression linéaire en tant qu'analyse de données permet d'obtenir le modèle expérimental ainsi défini.

Le modèle mathématique associé peut être condensé sous la forme matricielle suivante [34] :

$$Y = XA + E \quad (37)$$

avec

Y : le vecteur des réponses,

X : la matrice constituée par les valeurs que prennent les variables x_i , les produits deux à deux des variables $x_i * x_j$,

A : le vecteur des coefficients qui sont les inconnues à identifier,

E : le vecteur des erreurs.

Le principe des plans d'expériences consiste donc à ne considérer que certains jeux de valeurs, ces jeux étant choisis de façon optimale. On établit un plan d'expérience comportant le minimum d'essais. La méthode permet :

- d'obtenir la modélisation des expériences sur l'ensemble du domaine expérimental par un modèle linéaire,
- de planifier les essais en fonction d'un but recherché,
- de minimiser le nombre d'essais en évitant de réaliser des expériences inutiles.

On procède comme suit :

- les réponses représentant le phénomène physique étudié sont choisies,
- les facteurs supposés influents pour les réponses retenues et leurs domaines de variation sont déterminés,
- les couplages possibles entre les différents facteurs retenus sont analysés.

Pour estimer les coefficients d'un modèle, certaines stratégies expérimentales sont préférables à d'autres. La méthode mise en œuvre pour déterminer les coefficients du modèle postulé est d'autant meilleure que les variances des coefficients sont faibles. L'estimateur est d'autant plus efficace que sa variation est faible : plus la variance d'un estimateur est faible, plus l'estimateur est efficace (la dispersion des valeurs estimées est d'autant plus faible).

La technique des plans d'expériences [35, 36] consiste à combiner les niveaux des différents facteurs de façon à minimiser les termes de la matrice variance-covariance des coefficients du modèle.

La connaissance de l'origine des écarts entre les réponses mesurées et les réponses estimées permet d'améliorer la qualité de la modélisation. Le caractère aléatoire des réponses mesurées implique que les coefficients du modèle sont également des variables aléatoires, c'est-à-dire qu'il est donc important de regarder la précision de l'estimation.

Une démarche expérimentale classique consiste à répéter les expériences afin d'en déduire des estimateurs supposés d'autant plus fiables que le nombre d'essais est plus fiables. L'estimateur est d'autant plus efficace que l'on répète le plan d'expérience. Il n'en demeure pas moins que le plan de base est primordial. Un bon estimateur doit donc être :

- non biaisé, c'est à dire centré sur la valeur vraie du paramètre,
- sa variance doit être minimale.

3.2.3 Analyse des variances

L'analyse de la variance permet de voir quelle est la contribution des facteurs sur la variabilité de la réponse, c'est-à-dire tester si globalement un facteur ou une interaction ont une influence significative sur la réponse. L'hypothèse du modèle linéaire induit une variance expérimentale σ^2 constante sur la surface des réponses. Cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée. Pour s'affranchir des variations de σ^2 , on définit la variance de répétabilité, comme estimateur de σ^2 . Après application du modèle

$Y_{th} = \varphi_{th}(P_1, \dots, P_k)$, on obtient la variance résiduelle VAR_{res} par Fisher [37] :

$$VAR_{res} = \frac{\sum (Y_{exp} - Y_{th})^2}{N - k - 1} \quad (38)$$

où N représente le nombre d'expériences, k le nombre de variable du modèle, Y_{exp} la valeur de la réponse expérimentale et Y_{th} la valeur prédite par le modèle. Cette variance mesure l'écart entre les réponses mesurées et les réponses prédites par le modèle.

On estime la variance de répétabilité VAR_{rep} d'un essai. Celle-ci quantifie la dispersion de la réponse, pour un jeu de paramètres donné, qui découle des variations des caractéristiques internes du matériau testé et de la maîtrise imparfaite des conditions expérimentales. Elle peut être estimée en répétant r fois chacune des combinaisons N_c distinctes du plan d'expérience par la norme ISO 5725 [38].

$$VAR_{rep1} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^r (Y_{ij} - Y_i)^2}{N_c (r - 1)} \quad (39)$$

avec

- Y_{ij} : la valeur de l'essai i pour la répétition j ,
- Y_i : la moyenne arithmétique des r répétitions de l'essai i .

Elle peut être également estimée en répétant r fois un essai donné du plan :

$$VAR_{rep2} = \frac{\sum_{j=1}^r (Y_{ij} - Y_i)^2}{r-1} \quad (40)$$

Les deux estimations de la variance de répétabilité ne conduisent au même résultat que si cette variance est constante sur tout le domaine défini par le plan d'expérience.

On peut, pour résumer, dire que la variance résiduelle résulte de la somme de la variance de répétabilité (irréductible sans modifier le processus expérimental) et d'une variance B, représentant les erreurs de modélisation (oubli de certains facteurs influents, maîtrise imparfaite des valeurs des facteurs, forme mal adaptée du modèle) [39]:

$$VAR_{res} = k * VAR_{tot}$$

$$VAR_{res} = VAR_{rep} + B \Leftrightarrow 1 = \frac{VAR_{rep}}{VAR_{res}} + \frac{B}{VAR_{res}} \quad (41)$$

VAR_{tot} est la variance obtenue sur l'ensemble des valeurs des réponses considérées (à savoir f_i ou G_i). La qualité du modèle est d'autant meilleure que :

- le coefficient k est plus faible,
- le rapport $\frac{VAR_{rep}}{VAR_{res}}$ est plus proche de 1.

L'analyse de la variance permet aussi de caractériser le poids de la prise en compte de chaque facteur sur la qualité du modèle en comparant la variance résiduelle lorsque le facteur est pris en compte dans le modèle à celle calculée lorsqu'il est absent.

3.3 Bases des plans d'expériences

3.3.1 Plans factoriels complets

L'étude d'un plan complet consiste à prendre en compte toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience, chaque facteur prenant deux valeurs [40].

Si on considère un plan d'expérience à n facteurs de n_i niveaux, le nombre d'expériences sera de $\prod_{i=1}^n n_i$. Le modèle mathématique associé au plan d'expérience complet est un polynôme du premier degré par rapport à chaque variable. Si, on considère par exemple un plan factoriel à 3 facteurs (x_1, x_2, x_3), le modèle mathématique s'écrit alors :

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3$$

($a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{123}$) étant les coefficients du modèle.

3.3.1.1 Méthode générale de calcul des effets

L'effet moyen du facteur A au niveau i , noté E_{Ai} est donné par l'expression suivante :

$$E_{Ai} = \text{Moyenne des réponses lorsque A est au niveau } i - \text{moyenne générale}$$

Ainsi la réponse théorique de l'essai est donnée par l'expression

$$Y = \text{moyenne générale} + \sum_x E_{xi}$$

i : étant le niveau auquel est chaque facteur X dans l'essai.

Propriété : La somme des effets d'un facteur A est toujours nulle c'est-à-dire :

$$\sum_i E_{Ai} = 0, A \text{ étant le facteur et } i \text{ étant sont niveau.}$$

3.3.1.2 Effet d'une interaction

Lorsque l'effet d'un facteur dépend de la valeur prise par un autre facteur, cela se traduit par une interaction entre les deux facteurs. Le calcul de l'interaction I_{AiBj} est donné par :

$$I_{AiBj} = \text{Moyenne des réponses lorsque } (A=i, B=j) - \text{Moyenne générale} - E_{Ai} - E_{Bj}$$

3.3.2 Plans d'expériences fractionnaires

Le plan fractionnaire d'un plan complet est un plan qui permet d'estimer les coefficients du modèle avec beaucoup moins d'essais que ce dernier. Il est obtenu en fractionnant un plan factoriel complet. En général le plan fractionnaire coûtent moins cher que le plan complet, mais ce gain sera payé par des ambiguïtés dans l'estimation de certains effets d'actions que l'on appelle des ALLIAS (confusion des effets).

3.3.2.1 Méthode de construction des plans fractionnaires

a. Minimisation du nombre d'essais

La construction d'un plan fractionnaire s'apparente à une optimisation du nombre d'essais. Ce choix du nombre d'essais devant respecter :

- Conditions d'orthogonalité : un plan d'expérience est orthogonal vis-à-vis d'un modèle si toutes les actions (facteurs et interactions) disjointes, ne comportant pas de facteurs en commun, sont orthogonales deux à deux dans ce plan. Ceci peut s'exprimer par le fait que le produit scalaire des valeurs codées (+1 pour la valeur supérieure ou -1 pour la valeur inférieure) prises par les deux variables dans le plan est nul. Le nombre d'expériences minimal d'un plan orthogonal vis-à-vis d'un modèle est le plus petit multiple commun du produit du nombre de niveaux de toutes les actions disjointes prises deux à deux (on doit chercher un plan fractionnaire d'un plan complet déterminé d'une table multiple de ce ppcm).
- Conditions sur le nombre de degrés de liberté : le nombre de degrés de liberté du modèle correspond au nombre minimum d'expériences qu'il est nécessaire de réaliser pour connaître les coefficients du modèle. Pour obtenir un plan fractionnaire orthogonal d'un plan complet, il faut couper ce plan en deux parties en ne conservant par exemple que les niveaux hauts d'une colonne que l'on choisit. Le nombre d'expérience est divisé par deux mais on doit tenir compte du fait que les effets principaux ne sont plus purs mais confondus avec les interactions, c'est-à-dire aliassée

(l'action X est aliassée avec l'action Y implique que l'effet de X = l'effet de X + l'effet de Y).

b. Méthodologie de construction de Box & Hunter

Box & Hunter [35] ont défini une méthodologie qui consiste à ajouter des colonnes à un plan complet de base. Ces colonnes sont la combinaison linéaire de colonnes du plan complet considéré.

c. Méthode de Taguchi

Taguchi [36] a mis en place des tables standards dans les quelles les interactions d'ordre deux sont négligeables sauf quelques unes parfaitement identifiées. Le problème expérimental est synthétisé sous la forme de graphe (les facteurs sont représentés par des points et les interactions par des traits). L'établissement du graphe permet l'affectation aux facteurs des colonnes de la table choisie à partir de la condition d'orthogonalité et de la condition sur le nombre de degrés de liberté.

3.4 Proposition d'un modèle pour la période fondamentale : Cas des bâtiments de forme rectangulaire

Nous proposons de représenter la réponse dynamique d'un bâtiment de forme rectangulaire en fonction de ses caractéristiques géométriques. Pour pouvoir quantifier la géométrie de la structure, nous nous sommes imposés certaines restrictions à savoir (voir figure 3.1) :

- la structure est symétrique (géométrie, masse et raideur) dans les deux sens x et y,
- l'entre axe des poteaux est constant suivant les deux sens x et y respectivement,
- les voiles sont disposés aux quatre extrémités du bâtiment d'épaisseur 15 cm et de longueur de 1.20m,
- les poteaux ont des sections carrées,
- la hauteur inter- étage est prise constante et 3.06m,
- la cage d'escalier est centrée,

Nous avons aussi imposé les paramètres suivants pour l'analyse sismique [14] :

- la zone d'implantation : III,
- le groupe d'usage : 2,
- le type de sol : S3 (sol meuble),
- le coefficient de comportement R : 5,
- le facteur de qualité Q : 1.2.

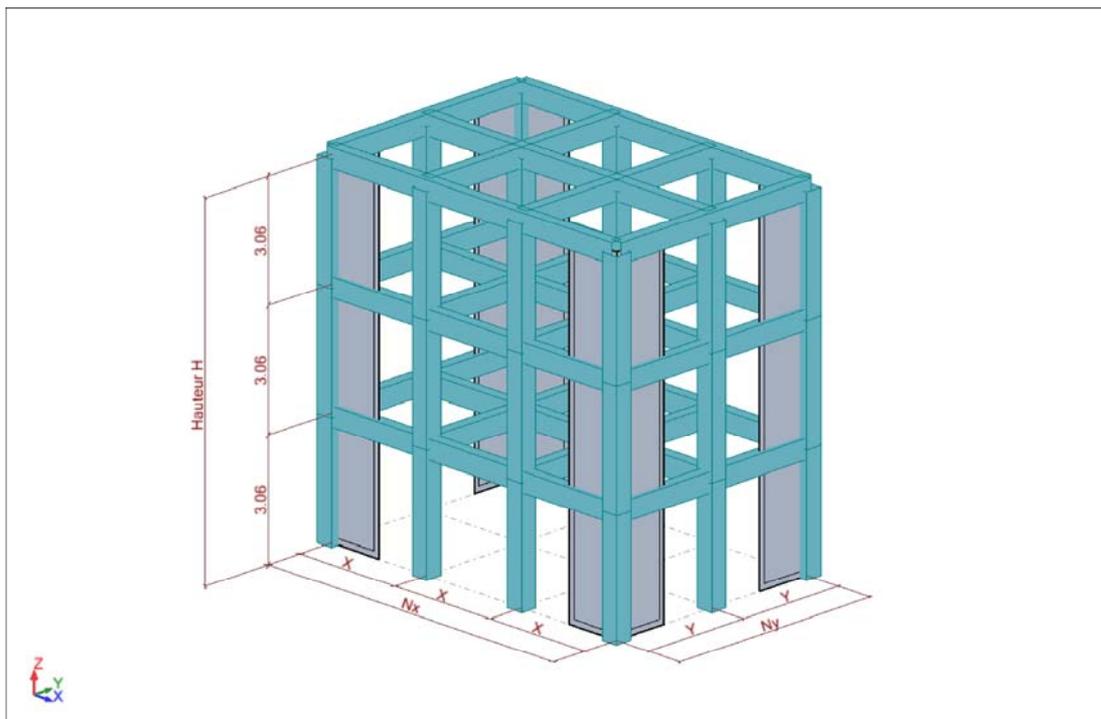


Figure 3.1 : Géométrie de la structure étudiée

On distingue alors les facteurs suivants susceptibles d'influencer la réponse dynamique :

Tableau 3.1 : Ensemble des facteurs retenus

Facteur	Type	Nombre de niveaux	valeurs
X : Distance entre axes des poteaux suivant l'axe x	quantitatif	2	3 et 5 m
Y : Distance entre axes des poteaux suivant l'axe y	quantitatif	2	3 et 5 m
N_x : Nombre des entres axes suivant l'axe x	quantitatif	2	3 et 6
N_y : Nombre des entres axes suivant l'axe y	quantitatif	2	2 et 3
a : Dimensions des poteaux	quantitatif	2	30 et 40 cm
H : Hauteur du bâtiment	quantitatif	4	9.18, 12.24, 15.30 et 18.36 m

La prise en compte a priori de certaines interactions constitue un ensemble d'hypothèses que la méthodologie permettra d'infirmer ou de valider. Nous considérons les interactions suivantes :

X*H : interaction entre la distance entre axe des poteaux suivant l'axe x et la hauteur du bâtiment H,

X*Y : interaction entre l'entre axe des poteaux suivant l'axe x et suivant l'axe y,

X* N_x : interaction entre l'entre axe des poteaux suivant l'axe x et le nombre des entres axes suivant x,

Y*H : interaction entre la distance entre axe des poteaux suivant l'axe y et la hauteur du bâtiment H,

Y* N_y : interaction entre la distance entre axe des poteaux suivant l'axe y et le nombre des entres axes suivant y,

a*H : interaction entre les dimensions des poteaux et la hauteur du bâtiment H.

Le modèle proposé pour la période fondamentale est :

$$Y = C_0 + C_1H + C_2X + C_3Y + C_4N_x + C_5N_y + C_6a + C_7XH + C_8XY + C_9XN_x + C_{10}YH + C_{11}YN_y + C_{12}aH$$

$(C_0, C_1, \dots, C_{12})$ sont les 13 coefficients à identifier et expriment la sensibilité de la réponse vis-à-vis de chaque action (facteur ou interaction).

En résumé, nous avons retenu :

- cinq facteurs à deux niveaux,
- un facteur à quatre niveaux,
- six interactions.

L'ensemble de ces valeurs, définit à priori le domaine de validité du modèle qui sera établi. L'extension de ce domaine ne pourra se faire sans précautions.

3.5 Détermination du plan

L'ensemble des combinaisons possibles conduit à prévoir $4 \times 2^5 = 128$ simulations. Le modèle choisi impose un nombre de simulations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \geq 21 \text{ pour permettre d'estimer tous les coefficients du modèle (conditions sur le} \\ \text{nombre de ddl).} \\ \geq 32 \text{ pour que le plan soit orthogonal.} \end{array} \right.$$

Le plan retenu est un plan en 32 essais, déduit des tables de Taguchi et donné ci-dessous.

Tableau 3.2 : Plan d'expérience des facteurs retenus et leurs niveaux

N° ESSAI	H (m)	X(m)	N _x	Y(m)	N _y	a(cm)
1	18.36	3	3	3	3	30
2	9.18	5	3	5	2	30
3	12.24	5	6	5	2	30
4	15.30	3	6	3	3	30
5	18.36	5	3	5	2	30
6	9.18	3	3	3	3	30
7	12.24	3	6	3	3	30
8	15.30	5	6	5	2	30
9	18.36	5	3	3	2	30
10	9.18	3	3	5	3	30
11	12.24	3	6	5	3	30
12	15.30	5	3	3	2	30
13	18.36	3	3	5	3	30
14	9.18	5	3	3	2	30
15	12.24	5	6	3	2	30
16	15.30	3	6	5	3	30
17	18.36	3	6	3	2	40
18	9.18	5	3	5	3	40
19	12.24	5	3	5	3	40
20	15.30	3	3	3	2	40
21	18.36	5	6	5	3	40
22	9.18	3	6	3	2	40
23	12.24	3	3	3	2	40
24	15.30	5	3	5	3	40
25	18.36	5	6	3	3	40
26	9.18	3	6	5	2	40
27	12.24	3	3	5	2	40
28	15.30	5	3	3	3	40
29	18.36	3	6	5	2	40
30	9.18	5	6	3	3	40
31	12.24	5	3	3	3	40
32	15.30	3	3	5	2	40

L'analyse des réponses constitue une étape importante : on pourra être amené à accepter ou rejeter le modèle.

3.6 Conclusion

Pour modéliser la réponse sismique d'une structure, nous avons établi un plan de simulations reposant sur la théorie des plans d'expériences. Celle-ci permettant de réduire le nombre de simulation à effectuer, de quantifier l'effet de chaque facteur et de hiérarchiser leur influence.

Nous avons aussi défini un modèle pour la période. Ce modèle a servi à choisir le plan d'expériences. Le nombre de simulations obtenu est réduit de façon considérable (32 au lieu de 128 simulations), ce qui rend l'étude plus simple.

CHAPITRE 4

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.1 Introduction

Après réalisation des simulations retenues, il convient d'analyser les résultats obtenus et de procéder à leur validation.

Nous avons établi un plan de 32 simulations pour la modélisation de la réponse sismique en prenant en compte les paramètres géométriques jugés influents.

Nous avons ensuite considéré des simulations supplémentaires (définies à partir du plan factoriel complet). Un total de 100 simulations a été retenu, pour évaluer les corrélations qui existent entre les efforts engendrés par l'action sismique.

4.2 Analyse des résultats du plan d'expériences

L'ensemble des simulations étant effectué (voir annexe 1), nous avons procédé à l'interprétation des résultats. Celle-ci se résume dans les étapes suivantes :

- quantification des effets de chacun des facteurs et interaction,
- identification des coefficients du modèle expérimental.

Pour chacune des conceptions retenues, une analyse sismique a été effectuée en utilisant le logiciel Robot [42]. Nous avons déterminé :

- la période fondamentale,
- le déplacement dans les deux directions horizontales,
- l'effort normal maximal dans les poteaux ainsi que le moment qui lui est associé,
- le moment fléchissant maximal dans les poteaux ainsi que l'effort normal qui lui est associé,
- Le moment fléchissant maximal dans les poutres (porteuses et secondaires),
- l'effort tranchant à la base du bâtiment.

4.2.1 Définition des variables centrées réduites

Lorsque l'on attribue la valeur -1 au niveau bas d'un facteur et la valeur $+1$ au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- on déplace l'origine des mesures

$$z_0 = \frac{z_{\min} + z_{\max}}{2}$$

La nouvelle origine z_0 , notée zéro, diffère donc de l'origine exprimée en unité courante.

- on change l'unité de mesure en divisant $(z - z_0)$ par le pas Δz . Ce dernier correspond à la nouvelle unité.

$$\Delta_z = \frac{z_{\max} - z_{\min}}{2}$$

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables que l'on appelle variables centrées réduites (**v.c.r**) (centrées pour indiquer le changement d'origine et réduites pour signaler la nouvelle unité). Le passage des variables d'origines aux variables centrées réduites x , et inversement, est donné par la formule suivante (z_0 étant la valeur centrale en unité courante) :

$$x = \frac{z - z_0}{\Delta_z}$$

Dans notre cas, l'intérêt des variables centrées réduites est de pouvoir présenter les plans d'expériences de la même manière quels que soient les domaines d'étude retenus et quels que soient les unités des facteurs utilisées. La théorie des plans d'expériences présente ainsi une grande généralité et se trouve simplifiée considérablement.

Les variables retenues sont données dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Facteurs retenus

Facteur	Valeurs réelles				Valeurs centrées réduites			
X : Distance entre axes des poteaux suivant l'axe x	3	-	-	5	-1	-	-	+1
Y : Distance entre axes des poteaux suivant l'axe y	3	-	-	5	-1	-	-	+1
N _x : Nombre des entres axes Suivant l'axe x	3	-	-	6	-1	-	-	+1
N _y : Nombre des entres axes suivant l'axe y	2	-	-	3	-1	-	-	+1
a : Dimensions des poteaux	30	-	-	40	-1	-	-	+1
H : Hauteur du bâtiment	9.18	12.24	15.30	18.36	-1	-0.33	+0.33	+1

4.2.2 Analyse de la contribution des facteurs

Nous précisons maintenant les éléments de validation de la cohérence du modèle en exposant la méthode qui permettra de quantifier la contribution effective d'un facteur à la réponse mesurée. Les hypothèses faites pourront être :

- soit validées et quantifiées,
- soit invalidées.

IL est important d'estimer le degré de confiance à accorder à l'existence des divers facteurs et interactions dans le modèle au vu des valeurs des coefficients associés. Sur la figure 4.1, on présente l'effet d'un facteur influent (figure 4.1a), l'écart entre les réponses lorsqu'on passe d'un niveau à l'autre est significativement différent de la dispersion résiduelle. Dans le cas contraire (figure 4.1b), il n'est pas évidant que l'écart observé soit dû au facteur lui-même.

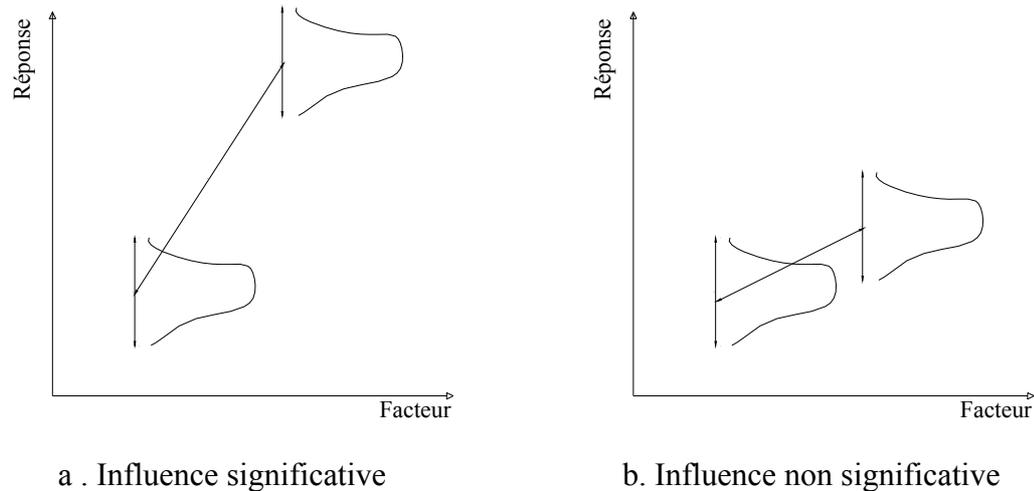


Figure 4.1 : Effet d'un facteur influent et non influent

Le rapport entre la variance induite par la variable x_i et la variance résiduelle suit une loi de Fisher à l_i et $N - k - 1$ degrés de liberté [34], l_i est le nombre de degrés de liberté de la variable x_i . Cela permet de quantifier le niveau de signification $(1 - \alpha)$ de l'hypothèse selon laquelle le facteur est influent : On considère que la probabilité que la variable x_i n'influe pas sur la réponse est égale à $(1 - \alpha)$. On considère que l'effet du facteur est significatif si $\alpha < 5\%$ et est hautement significatif si $\alpha < 1\%$.

4.2.3 Expertise du modèle originel

On rappelle que l'étude est consacrée à l'élaboration du modèle expérimental pour la période fondamentale T proposé dans le chapitre III.

L'effet des facteurs qui affectent T est résumé dans le tableau 4.2 où apparaissent les facteurs influents. On met en évidence le rôle joué par :

- la géométrie de la structure (hauteur, longueur et largeur),
- les dimensions des poteaux,
- l'espacement entre les poteaux.

Tableau 4.2 : Niveau de signification des facteurs influents T

Facteur	Niveau de signification α
a	0%
H	0%
N_x	0%
N_y	0%
X	0%
X.H	3%
Y	0%
Y.H	0.1%

Le modèle identifié par la régression linéaire multiparamétrique est le suivant :

$$T = 0.48 - 0.44a + 0.18H + 0.04N_x - 0.03N_y + 0.03X + 0.02XH + 0.05Y + 0.03YH \quad (42)$$

Sur la figure 4.2, on compare les réponses expérimentales à celles prédites par le modèle pour la période. Ces deux valeurs sont bien corrélées ($R^2 = 0.96$).

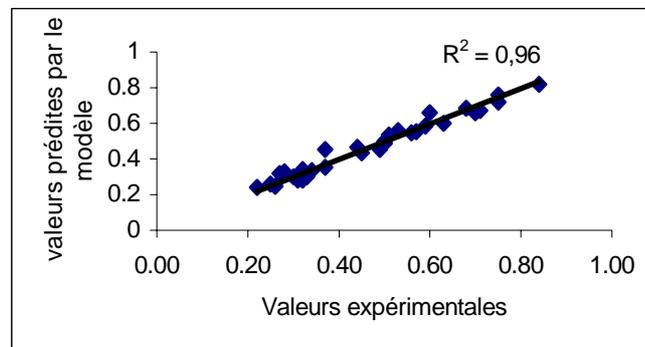


Figure 4.2 : Réponses expérimentales et valeurs prédites pour période fondamentale T

Dans le modèle ainsi établi, on remarque que le coefficient affecté à la hauteur est d'un ordre supérieur. Ce qui confirme l'importance de la hauteur sur la période fondamentale.

4.2.4 Proposition d'un modèle simplifié pour T

L'analyse statistique univariée des résultats du plan de simulations, obtenue en ne considérant que l'effet de la hauteur du bâtiment conduit à l'équation suivante pour la période T :

$$T = 0.48 + 0.18H \quad (43)$$

La figure 4.3 représente les réponses expérimentales en fonction des valeurs prédites par le modèle simplifié. Ces deux valeurs sont bien corrélées ($R^2 = 0.66$).

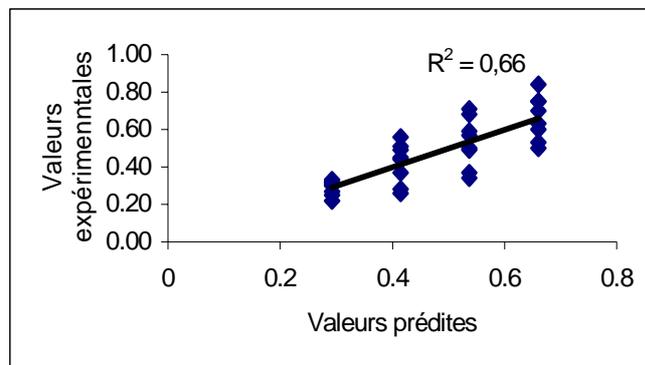


Figure 4.3 : Réponses expérimentales en fonction des valeurs prédites par le modèle pour la période fondamentale T.

Nous avons aussi comparé les valeurs prédites par le modèle simplifié de la période avec celles données par le RPA (voir figure 4.4). Les deux modèles sont bien cohérents ($R^2 = 0.75$). Cette corrélation traduite par l'équation ($T_{RPA} = 0.75 \times T$), est en accord avec le règlement qui stipule que les valeurs estimées à partir des méthodes numériques ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques appropriées de plus de 30%.

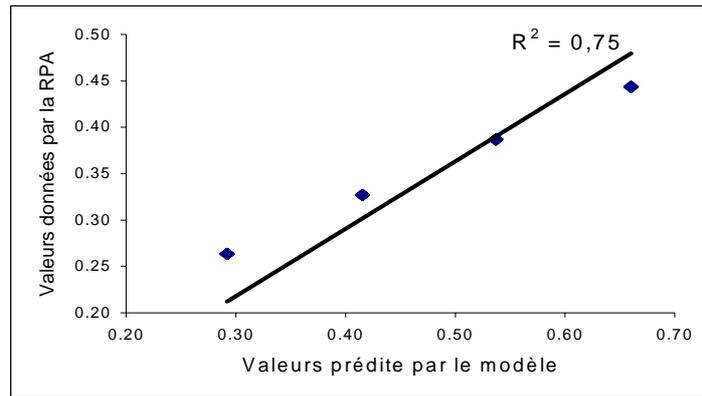


Figure 4.4 : Valeurs données par le RPA en fonction de celle prédites par le modèle T

4.2.5 Corrélation entre les déplacements observés et la période fondamentale

La figure 4.5 montre une bonne corrélation entre les déplacements suivant les deux directions horizontales ($R^2 = 0.85$). Celle-ci se traduit par la relation suivante :

$$\delta_y = 1.04\delta_x - 0.08 \quad (44)$$

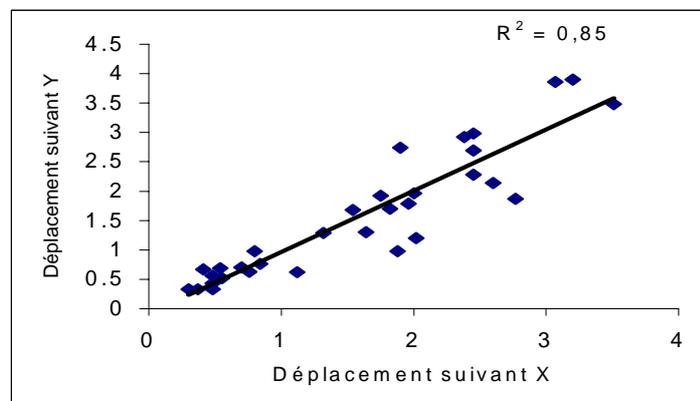


Figure 4.5 : Corrélation entre les déplacements suivant les deux directions X et Y.

La connaissance du déplacement dans une des deux directions horizontales est alors suffisante.

Sur la figure 4.6, nous avons évalué la corrélation qui existe entre le déplacement suivant x et la période fondamentale. Ces deux valeurs sont bien corrélées ($R^2 = 0,90$) et cette relation se traduit par l'équation suivante :

$$\delta_x = 0.18T + 0.2 \quad (45)$$

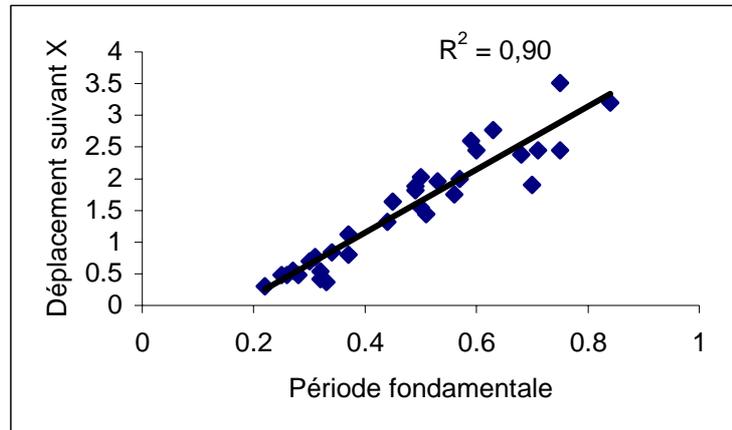


Figure 4.6 : Corrélation entre les déplacements suivant x et la période fondamentale T.

Ainsi la connaissance de la période fondamentale de la structure seule permet d'identifier les déplacements maximums observés.

4.2.6 Modélisation des efforts dans les poteaux

4.2.6.1 Effort normal maximum dans les poteaux

Le tableau 4.3 récapitule les facteurs dont les effets sont significatifs sur l'effort normal maximal.

Tableau 4.3 : Niveau de signification des facteurs influents N_{max}

Facteur	Niveau de signification α
aH	6%
H	0%
N_x	0%
N_y	0%
X	0%
XH	2%
XN_x	0%
XY	5%
Y	0%

Le modèle donné par la régression multiparamétrique est le suivant :

$$N_{\max} = 67.06 + 4.11aH + 23.61H + 12.15N_x - 9.52N_y + 11.52X + 5.18XH - 4.65XN_x + 3.20XY + 9.07Y \quad (46)$$

La figure 4.7 montre une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par le modèle ainsi trouvé ($R^2 = 0.93$).

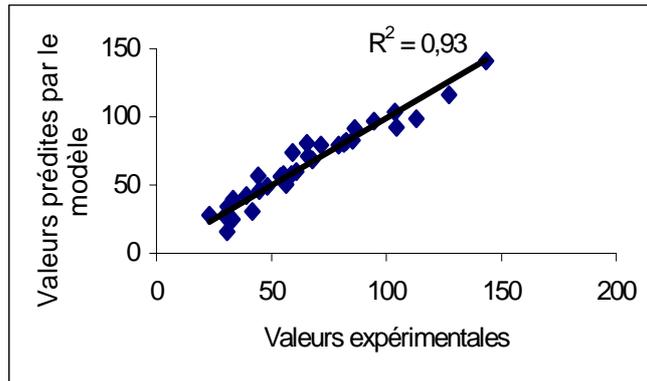


Figure 4.7 : Les réponses expérimentales en fonction des valeurs prédites par le modèle pour l'effort normal maximal N_{\max} .

4.2.6.2 Corrélation entre les efforts obtenus dans les poteaux

Dans cette partie, nous avons considéré un plan de 100 simulations retenues du plan factoriel complet.

4.2.6.2.1 Effort normal maximal

La figure 4.8 représente la corrélation qui existe entre l'effort normal maximum ainsi que le moment fléchissant correspondant. Ces deux valeurs sont bien corrélées ($R^2 = 0.65$) et cette relation est représenté par l'équation suivante :

$$M_f = 0.073N_{\max} - 0.56 \quad (47)$$

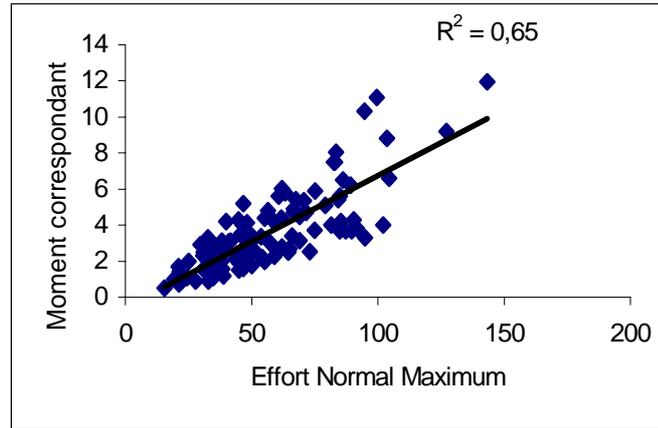


Figure 4.8 : Corrélation entre l'effort normal maximal et le moment correspondant

4.2.6.2.2 Moment fléchissant maximal

La figure 4.9 représente la corrélation qui existe entre le moment fléchissant maximal et l'effort normal correspondant dans les poteaux. La corrélation est moins bonne ici ($R^2 = 0.51$) mais reste acceptable. Cette relation se traduit par :

$$M_{\max} = 0.2N_{\text{cor}} + 4.76 \quad (48)$$

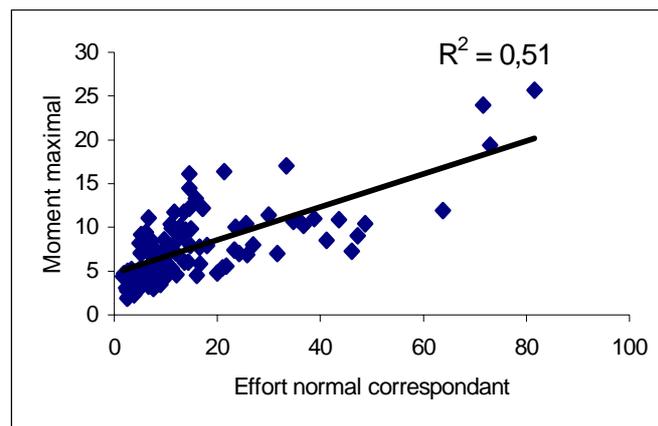


Figure 4.9 : Corrélation entre le moment fléchissant maximal et l'effort normal correspondant

La figure 4.10 traduit la corrélation entre le moment fléchissant maximal et l'effort normal maximal ($R^2 = 0.75$). Celle-ci se traduit par la relation suivante :

$$M_{\max} = 0.15N_{\max} - 0.53 \quad (49)$$

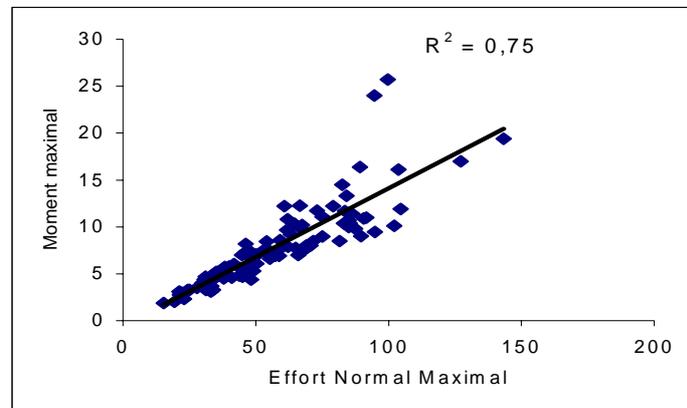


Figure 4.10 : Corrélation entre le moment fléchissant maximal et l'effort normal maximal

4.2.6.3 Effort tranchant à la base

La figure 4.11 montre une bonne corrélation entre les valeurs de l'effort tranchant suivant les deux directions horizontales ($R^2 = 0.92$). Celle-ci se traduit par la relation suivante :

$$V_y = 0.8V_x + 152.74 \quad (50)$$

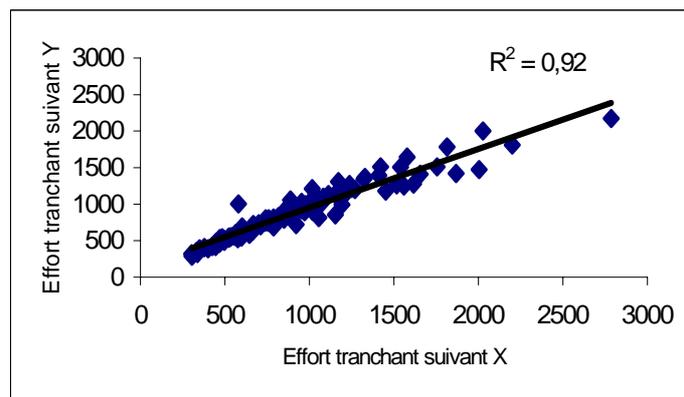


Figure 4.11 : Corrélation entre l'effort tranchant à la base suivant les deux directions X et Y

La figure 4.12 montre une bonne corrélation entre l'effort tranchant à la base suivant x et l'effort normal maximal ($R^2 = 0.62$). Cette corrélation se traduit par l'équation suivante :

$$V_x = 14.5N_{\max} + 106.5 \quad (51)$$

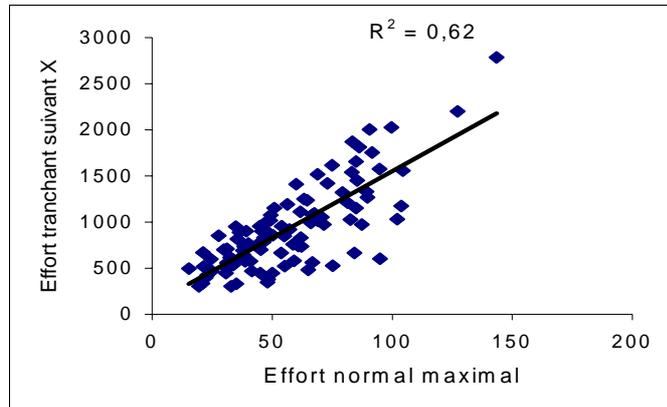


Figure 4.12 : Corrélation entre l'effort tranchant à la base et l'effort normal maximal

4.2.7 Modélisation des moments fléchissants dans les poutres

Le tableau 4.4 résume l'ensemble des facteurs dont l'effet est significatif sur le moment fléchissant en travée observé dans les poutres porteuses du plan des 32 simulations.

Tableau 4.4 : Niveau de signification des facteurs influents le moment fléchissant

Facteur	Niveau de signification α
a	9%
H	0.5%
N_x	5%
N_y	1%
X	7%
X.H	3%

4.2.7.1 Moment en travée (poutres porteuse)

L'analyse statistique des résultats obtenus pour les 32 simulations effectuées a donné le modèle suivant pour le moment observé en travée

$$M_t = 8.16 + 0.73a + 1.75H + 0.9N_x - 1.13N_y + 0.79X - 1.27XH \quad (52)$$

Celui-ci représente de façon acceptable la surface de réponse (voir figure 4.13).

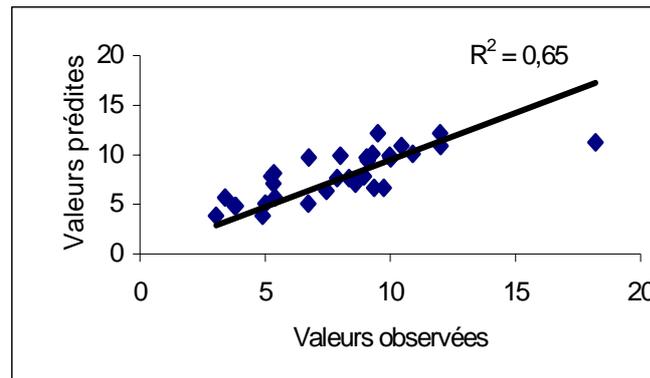


Figure 4.13 : Les réponses expérimentales en fonction des valeurs prédites par le modèle pour le moment en travée poutres porteuses.

4.2.7.2 Corrélation entre les moments obtenus

Nous avons observé la corrélation qui existe entre le moment en travée et le moment aux appuis dans le cas des poutres porteuses et secondaires respectivement (voir figure 4.14 et 4.15). Ces deux valeurs sont bien reliées ($R^2=0.80$ et $R^2=0.84$ respectivement) :

$$M_a = 1.30M_t - 0.65 \quad (53)$$

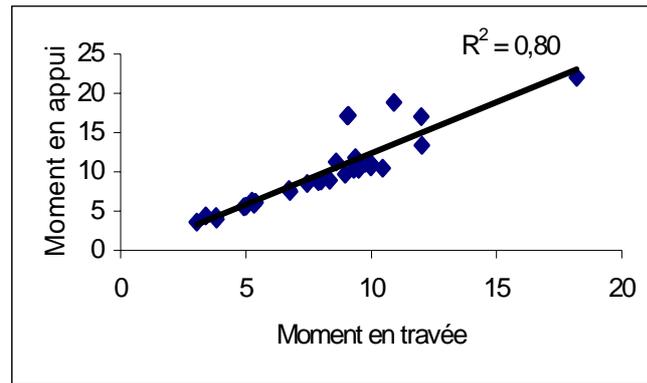


Figure 4.14 : Corrélation entre le moment n travée et le moment en appuis dans les poutres porteuses

et

$$M_a = 1.34M_t - 0.74 \quad (54)$$

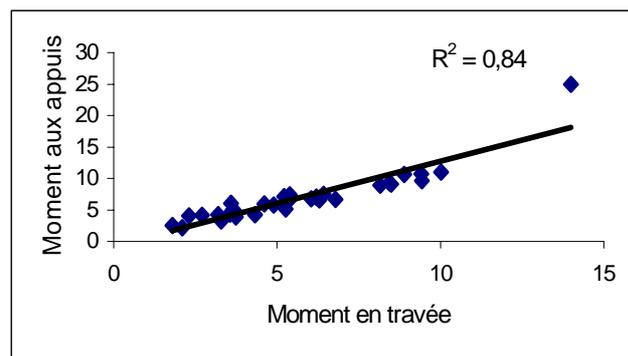


Figure 4.15 : Corrélation entre le moment n travée et le moment en appuis dans les poutres secondaires

La figure 4.16 montre une bonne corrélation entre le moment en travée pour les poutres porteuses et secondaires ($R^2 = 0.61$). Cette corrélation s'exprime par la relation :

$$M_{t\text{secondaire}} = M_{t\text{porteuse}} 0.69 + 0.11 \quad (55)$$

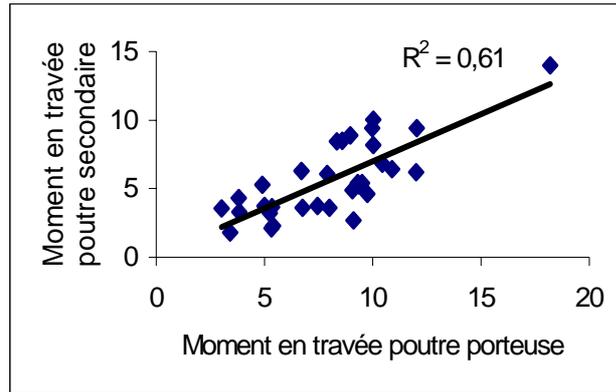


Figure 4.16 : Corrélation entre les moments en travée et les moments en appuis dans les poutres porteuses et secondaires

4.2.8 Validation des modèles

L'analyse statistique établie sur le plan des 32 simulations a montré que la connaissance de la période fondamentale, de l'effort normal maximal dans les poteaux et moment fléchissant en travée dans les poutres porteuses sont suffisants pour déterminer l'ensemble des efforts et déplacements dus à l'action sismique.

Dans cette partie, nous allons valider les modèles établis pour les paramètres cités ci-dessous en considérant un ensemble de 10 bâtiments choisis du domaine expérimental et dont les caractéristiques géométriques sont données dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Les caractéristiques géométriques pour les dix bâtiments

N° ESSAI	H (m)	X(m)	N _x	Y(m)	N _y	a(cm)
1	9.18	5	3	5	2	30
2	15.30	3	6	3	3	30
3	15.30	5	6	5	2	30
4	12.24	3	6	5	3	30
5	15.30	5	3	3	2	30
6	18.36	3	6	3	2	40
7	9.18	5	3	5	3	40
8	12.24	5	3	5	3	40
9	15.30	5	3	5	3	40
10	12.24	5	3	3	3	40

Nous avons comparé les valeurs de la période T , l'effort normal maximal dans les poteaux N_{\max} et le moment fléchissant en travée dans les poutres porteuses M_f obtenues par

notre modèle à celles calculées par le logiciel (tableau 4.6). On y trouve aussi l'écart entre les différentes valeurs de T , N_{\max} et M_f , (il est défini comme le rapport entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales).

Tableau 4.6 : Validation de la période, l'effort normal maximal et moment fléchissant calculées par logiciel et le modèle utilisé

N° Essais	T (s)			N _{max} (t)			M _f (t.m)			
	Valeurs expérimentales	valeurs prédites	écart %	valeurs expérimentales	valeurs prédites	écart %	valeurs expérimentales	valeurs prédites	écart %	
1	0.30	0.30	0	48.2	49.15	2	5.4	5.71	5.74	
2	0.57	0.55	4	81.5	80.71	1	10.02	9.66	3.6	
3	0.68	0.68	0	94.7	96.97	2	5.35	8.14	52.15	
4	0.56	0.55	2	85.4	83	3	8.35	7.67	8.14	
5	0.50	0.48	4	55.3	57.43	4	7.45	6.35	14.77	
6	0.50	0.50	0	79.2	79.49	0.3	10.45	10.89	4.21	
7	0.31	0.28	10	60.8	59.49	2	9.10	9.43	3.63	
8	0.45	0.43	4	82.6	82.07	1	9.05	9.75	7.73	
9	0.59	0.58	2	103.7	103.72	0	10.90	10.07	7.61	
10	0.37	0.35	4	58.8	57.47	2	6.75	9.75	44	
Ecart moyen %			3				2			8

Les modèles revêtent un caractère prédictif fiable : écart moyen étant de 3% pour T , 2% pour N_{\max} dans les poteaux et 8% pour M_f dans les poutres porteuses.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a mis en évidence l'ensemble des facteurs dont l'effet est significatif sur les réponses sismiques mesurées à partir du plan expérimental.

Un modèle a été établi pour la période fondamentale, l'effort normal maximal dans les poteaux et le moment fléchissant en travée dans les poutres porteuses. Ces modèles, correspondant à un développement limité des paramètres géométriques des bâtiments et représentent adéquatement la surface des réponses. Ces modèles ont été validés sur des bâtiments choisis dans le domaine expérimental retenu.

Nous avons aussi établi les corrélations qui existent entre les différents paramètres mesurés.

La qualité de ces relations montre que la connaissance de :

- la période est suffisante pour estimer les déplacements dans les deux directions horizontales,
- l'effort normal maximal est suffisant pour déterminer l'ensemble des efforts engendrés dans les poteaux,
- le moment fléchissant en travée dans les poutres porteuses était suffisant pour l'évaluation des moments aux appuis des poutres porteuses et des moments dans les poutres secondaires (en appuis et en travée).

CONCLUSION

Pour simplifier l'évaluation du comportement dynamique des structures, dans la phase de conception, nous avons proposé une approche basée sur la modélisation des bâtiments par l'utilisation des concepts d'objets. En effet, cette technique permet de déterminer de façon systématique la réponse sismique en fonction des paramètres géométriques sans avoir recours à la simulation numérique.

En rappelant les étapes requises lors de l'analyse sismique d'une structure par l'utilisation d'un logiciel aux éléments finis et en considérant les préconisations du règlement parasismique, nous avons identifié les paramètres qui régissent le comportement dynamique de la structure et la réponse sismique à savoir la période fondamentale, les déplacements ainsi que les efforts engendrés dans les éléments porteurs.

Pour décrire la réponse sismique, nous avons établi un plan de simulations en nous basant sur la théorie des plans d'expériences qui se traduit par l'élaboration d'un modèle défini en fonction des facteurs et des couplages entre certains facteurs et guide le choix des essais à effectuer.

Le plan de simulations est établi en considérant des bâtiments de forme rectangulaire avec des entre axes constantes dans les deux directions horizontales respectivement et respectent les recommandations du RPA. Après exécution de l'ensemble des simulations, l'analyse des résultats du plan des simulations a permis de modéliser la période fondamentale ainsi que les efforts engendrés par l'action sismique. Ces modèles représentent de façon acceptable la surface expérimentale ($R^2 > 65\%$) et leur validation sur des exemples choisis dans le domaine expérimental montre leur caractère prédictif (un écart inférieur à 5% pour la période et le déplacement et inférieur à 10% pour les efforts).

Nous avons aussi présenté un modèle pour la période fondamentale qualifié de simplifié, qui intègre, uniquement l'effet de la hauteur. Le modèle ainsi présenté

représente adéquatement le domaine expérimental et reste très cohérente avec la valeur indiquée par le RPA

Les résultats obtenus sont très encourageants et il serait donc intéressant d'étendre l'étude à des bâtiments de formes géométriques diversifiées à savoir des bâtiments en 'I', en 'L', en 'U' et en 'T'. Ceci permettra de générer une base d'informations utile à l'ingénieur et qui pourrait lui servir de base dans l'évaluation du comportement dynamique des bâtiments. Il est clair que cette approche présente une limitation du fait qu'elle ne puisse s'appliquer qu'à des bâtiments de forme régulière et dont la géométrie peut être quantifiée. Si on voulait élargir le domaine à des structures de forme irrégulière, on pourrait aussi évaluer une approche qui sera basée sur le concept d'objets intelligents qui intègre une connaissance accompagnée de raisonnements (Case based reasoning system [41]).

APPENDICE

A- RAPPELS THEORIE DES PLANS D'EXPERIENCES

1-1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous introduirons les notions de base nécessaire à la compréhension de la méthode des plans d'expériences. Pour cela nous nous sommes appuyés sur des exemples simples pris dans la littérature et faisant intervenir deux facteurs, dont les niveaux prennent pour chacun d'eux, seulement deux valeurs (niveau bas et niveau haut). Ces plans portent le nom de plans factoriels complets à deux niveaux.

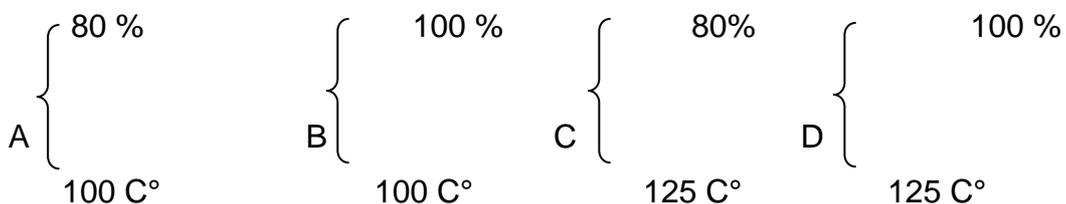
Ces notions seront ensuite généralisées pour des plans factoriels faisant intervenir plusieurs facteurs à deux niveaux : Plans $2^3, 2^4, \dots, 2^k$, où k désigne le nombre de facteurs. La notation 2^k également le nombre d'essais à faire, nombre devenant rapidement important lorsque k est supérieur à 3 ou 4. Pour diminuer le nombre des essais, tout en conservant la possibilité d'étudier tous les facteurs, on introduit les plans factoriels fractionnaires. La construction de ces derniers plans nécessite la connaissance de la théorie des aliases, théorie que nous développerons dans ce chapitre.

Nous donnerons également un aperçu sur la construction d'autres plans, plans les plus utilisés, et enfin nous traiterons l'évaluation de la qualité des modèles, adoptés à l'aide de quatre méthodes différentes.

1.2 Plans complets à deux niveaux et deux facteurs 2²- Notions de base

Prenons l'exemple de Johnson et Leone (Statics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences, Wiley, 1977). L'expérience consiste à étudier la déformation d'une plaquette métallique contenant un certain pourcentage de cuivre. Deux facteurs ont été retenus, le pourcentage en cuivre (Facteur 1) et la température (Facteur 2). La réponse est la mesure de cette déformation (l'unité n'est pas précisée dans le texte d'origine).

Le domaine expérimental (figure1) est défini par les quatre points expérimentaux :



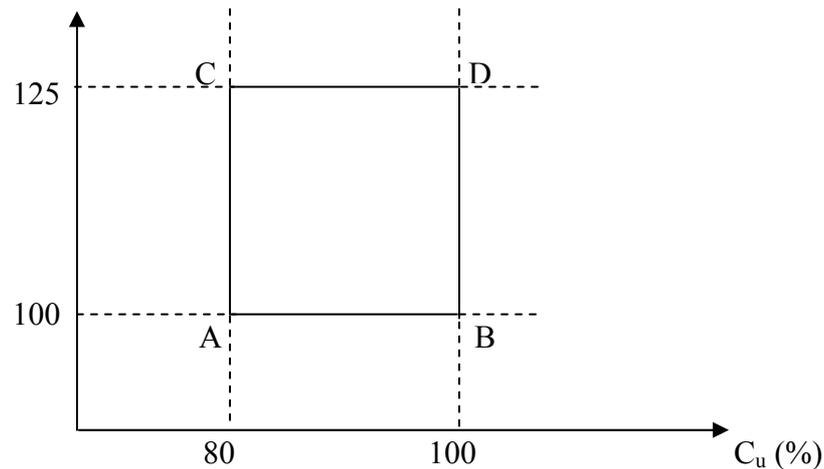


Figure 1 : Domaine expérimental ou domaine d'étude

Pour obtenir les réponses qu'il cherche, l'expérimentateur va adopter une stratégie de recherche. Par exemple, il peut fixer le pourcentage en cuivre à 90% et réaliser trois expériences à 100, 112.5 et 125 °C. Puis pour étudier l'influence de pourcentage en cuivre contenu dans la plaquette, il fixera le température à 112.5 °C et réalisera trois expériences à 80%, 90% et 100%. Il peut ajouter un dernier essai afin de confirmer ses conclusions. L'étude aura alors coûté sept expériences.

L'expérimentateur aurait pu sélectionner une autre stratégie en disposant au hasard ses points expérimentaux à l'intérieur du domaine d'étude. Mais existe-t-il une meilleure stratégie ? .Stratégie qui réduira au maximum le nombre des essais sans pour autant sacrifier la précision et qui permettra d'aboutir aux mêmes conclusions. Cette meilleure stratégie existe. Elle consiste à placer les points expérimentaux aux quatre extrémités A, B, C et D du domaine d'étude (Figure2). Cette stratégie est celle retenue par les plans d'expériences à deux niveaux. Elle permet non seulement de diminuer le nombre des essais, mais aussi, de pousser plus loin encore l'analyse des résultats.

Pour représenter les essais, on convient de symboliser le niveau bas de chaque facteur par -1 et le niveau haut par $+1$. Il est alors possible de rassembler tous les éléments de l'expérimentation dans un tableau que l'on nomme matrice des expériences (tableau 1).

Tableau1- Matrice d'expériences

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Réponses
1	-1	-1	y1=23.95
2	+1	-1	y2=31.35
3	-1	+1	Y3=22.50
4	+1	+1	Y4=29.90

Niveau -	80%	100°C
Niveau +	100%	125°C

Reportons sur la figure 2, les points expérimentaux, Les réponses mesurées (cercles pleins) ainsi que les réponses calculées (cercles vides. Nous désignerons par \bar{y}_+ et \bar{y}_- les moyennes des essais aux niveaux haut et bas du pourcentage en cuivre et par \bar{y}'_+ et \bar{y}'_- les moyennes des essais aux niveaux haut et bas de la température.

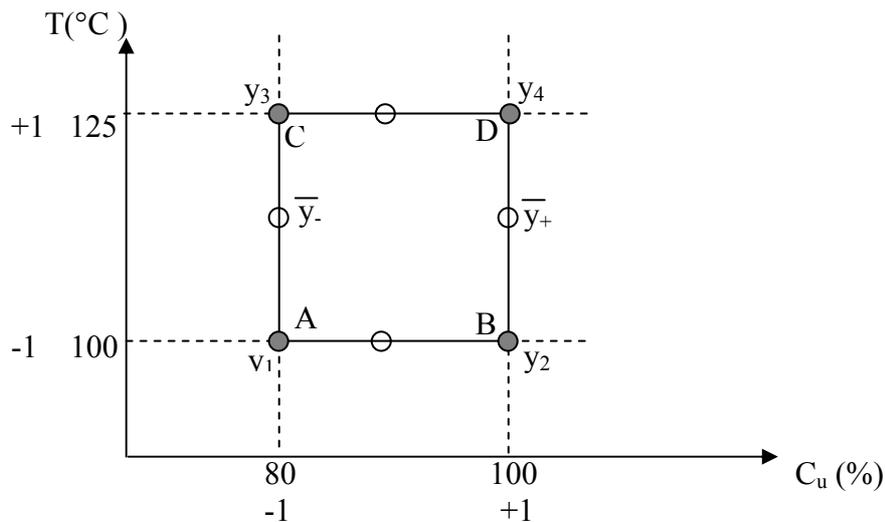


Figure 2 : Points expérimentaux et réponses mesurées

A chaque du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponse qui se localisent sur une surface appelée surface de réponse (figure3).

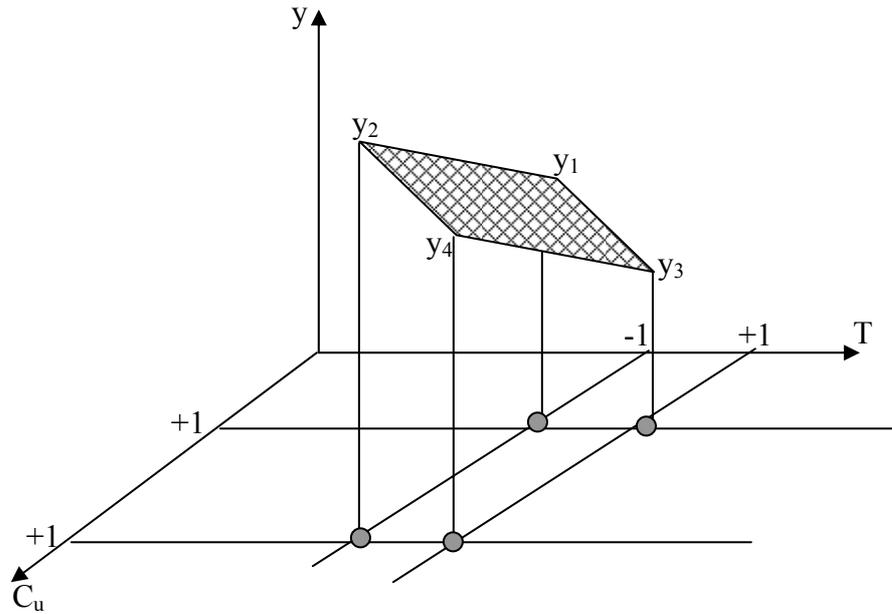


Figure 3 : Définition de la surface de réponse

1.2.1 : Effets d'un facteur

Nous appellerons effet d'un facteur sur y , toute variation de y consécutive à un changement de niveau de ce facteur. On remarque que les segments correspondant aux niveaux $T=100^{\circ}\text{C}$ et $T=125^{\circ}\text{C}$ sont parallèles. Par définition, nous appellerons effet global du facteur 1 (% en Cu), la différence entre la moyenne \bar{y}_+ des réponses au niveau haut et la moyenne \bar{y}_- au niveau bas de ce facteur. Cet effet sera matérialisé par un segment de droite (figure 4). Si la pente d'un segment est positive l'effet est positif. Si la pente est négative, l'effet est négatif.

$$\bar{y}_+ = \frac{1}{2}(y_2 + y_4) = 30.62$$

$$\bar{y}_- = \frac{1}{2}(y_1 + y_3) = 23.22$$

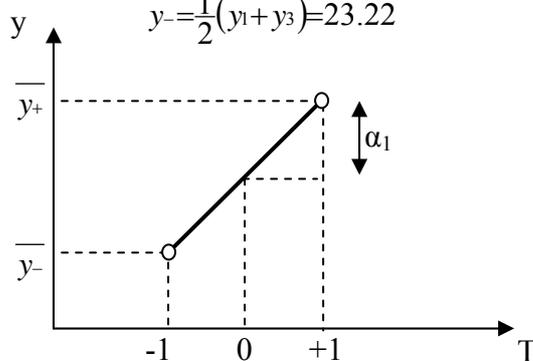


Figure 4 : Graphe de l'effet du facteur 1 (% en Cu)

Par définition, l'effet moyen α_1 est la moitié de l'effet global. C'est aussi la variation de la réponse entre le centre du domaine d'étude et le niveau haut du facteur.

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}(\bar{y}_+ - \bar{y}_-) = \frac{1}{4}(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) = 3,7 \quad (4.1)$$

De la même manière, nous pouvons tracer le graphe de l'effet de la température α_2 et donner la formule permettant de le calculer (figure 5).

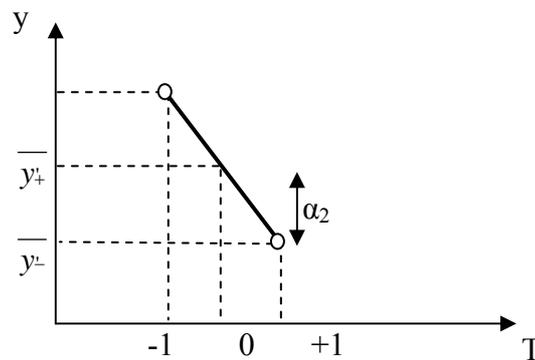


Figure 5 : Graphe de l'effet du facteur 2 (température)

$$\bar{y}_+ = \frac{1}{2}(y_3 + y_4) = 26.2$$

$$\bar{y}_- = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) = 27.65$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2}(\bar{y}_+ - \bar{y}_-) = \frac{1}{4}(-y_1 - y_2 - y_3 + y_4) = -0.725 \quad (4.2)$$

Le coefficient α_0 est la valeur calculée de la réponse au centre de domaine d'étude ;

$$\alpha_0 = \frac{1}{4}(+y_1 + y_2 + y_3 + y_4) = 26.92 \quad (4.3)$$

Remarque

Il est facile de retrouver les formules (4.1) et (4.2) donnant les effets α_1 et α_2 . Il suffit de faire le produit scalaire de la colonne correspondante au facteur considéré de la matrice d'expériences par la colonne des réponses, puis de diviser par les nombres des essais qui est $N=4$. Cette manière de calculer les effets se généralise à tous les plans factoriels à deux niveaux et k facteurs 2^k .

Conclusion

Dans les conditions expérimentales choisies, le facteur 1(% en Cu) a un effet positif sur la réponse et il est plus influent que la température.

1.2.2 Interaction entre facteurs -Matrice des effets

Dans l'exemple précédent, l'effet d'un facteur est le même lorsque l'autre facteur est fixé au niveau bas ou bien au niveau haut. On dit qu'il n'y a pas d'interaction entre les deux facteurs.

Dans l'exemple suivant pris en référence, nous allons voir que l'effet d'un facteur sur la réponse varie suivant que l'on se place au niveau bas ou au niveau haut de l'autre facteur. On dit qu'il y a interaction entre les deux facteurs. Cette interaction peut même être quantifiée par le calcul du coefficient α_{12} mesurant cette interaction.

Le niveau de vibration au niveau de la surface lors de la découpe est considéré comme étant la principale cause de la variation des dimensions des entailles. On pense que deux facteurs influent sur l'intensité des variations : dimension de l'outil utilisé (1/16" et 1/8») et vitesse de découpage (40 et 90 tr/min). La réponse est une moyenne entre les dimensions de l'entaille (L'unité n'est pas précisée par l'auteur).

Tableau 2- Matrice d'expériences

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Réponses
1	-1	-1	y1=16.10
2	+1	-1	y2=24.02
3	-1	+1	y3= 14.92
4	+1	+1	y4= 40.27

Niveau -	1/16 "	40tr/min
Niveau +	1/8 "	90tr/min

Sur la figure 6 nous avons représenté le domaine d'étude, les points expérimentaux ainsi que les réponses mesurées et calculées.

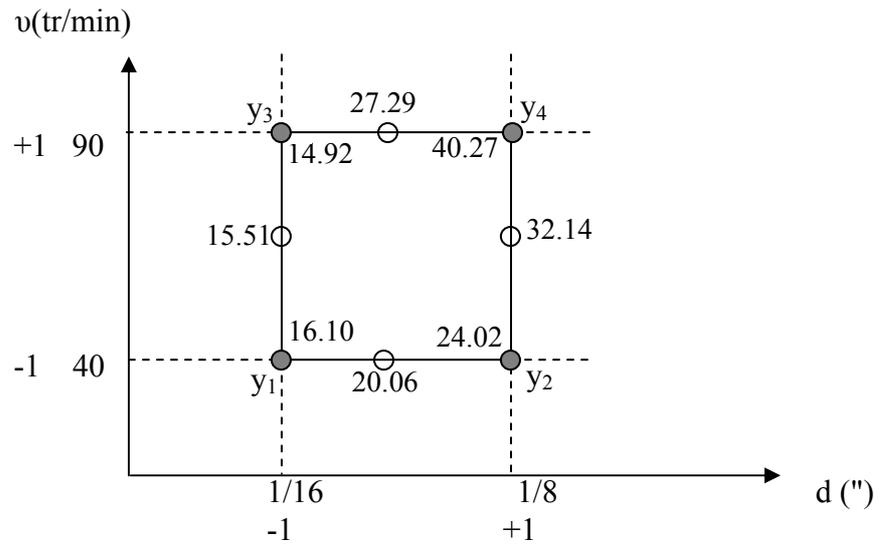


Figure 6: Domaine d'étude Points expérimentaux (circuit imprimé)

On obtient les graphes des effets suivants (figure 7 et 8)

$$\begin{aligned} \overline{y_+} &= \frac{1}{2}(y_2 + y_4) = 30.14 & \overline{y_-} &= \frac{1}{2}(y_1 + y_3) = 15.51 \\ \alpha_1 &= \frac{1}{2}(\overline{y_+} - \overline{y_-}) = \frac{1}{4}(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) = 8.31 \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \overline{y_+} &= \frac{1}{2}(y_3 + y_4) = 27.59 & \overline{y_-} &= \frac{1}{2}(y_1 + y_2) = 20.06 \end{aligned}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2}(\overline{y_+} - \overline{y_-}) = \frac{1}{4}(-y_1 - y_2 + y_3 + y_4) = 3.76 \quad (4.6)$$

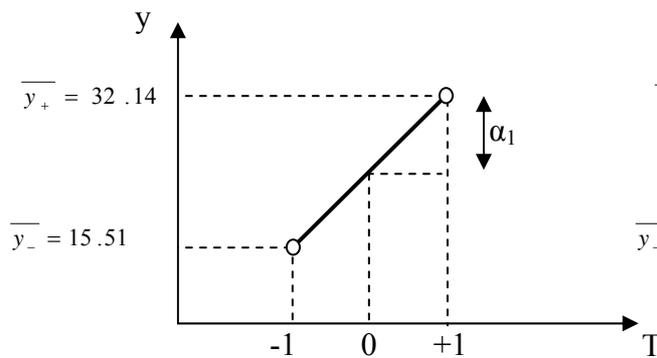


Figure 7 : Effet de la dimension de l'outil

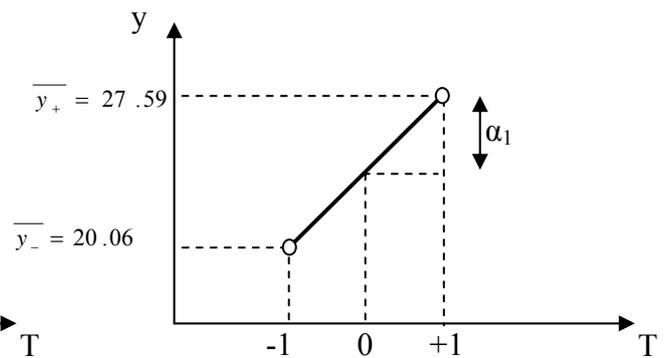


Figure 8 : Effet de la vitesse de découpage

Selon que l'on se place au niveau haut ou au niveau bas d'un facteur, l'effet de l'autre facteur n'est pas le même.

L'interaction apparaît comme le demi -différence entre l'effet du facteur 1 au niveau haut du facteur 2 et l'effet du facteur 1 au niveau bas du facteur 2. Elle traduit une variation de l'effet d'un facteur en fonction du niveau d'un autre facteur.

$$E_{21} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2}(y_4 - y_3) - \frac{1}{2}(y_2 - y_1) \right] = \frac{1}{4}(y_1 - y_2 - y_3 + y_4) = 4.35 \quad (4-7)$$

De même, l'interaction de la dimension sur la vitesse est donnée par:

$$E_{12} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2}(y_4 - y_2) - \frac{1}{2}(y_3 - y_1) \right] = \frac{1}{4}(y_1 - y_2 - y_3 + y_4) = 4.35 \quad (4.8)$$

On remarque que

$$a_2 = a_{21}$$

Conclusion: la dimension de l'outil est le facteur le plus influent sur la réponse. Il existe une interaction entre les deux facteurs. Pour obtenir une faible variation des dimensions de l'entaille, il faut choisir un outil de faible dimension (1/16") et une grande vitesse de découpe (90 tr/min).

Matrice des effets:

Ici, aussi il est possible de rassembler tous les éléments de l'expérimentation dans une matrice que l'on nomme matrice des effets. Cette matrice permet d'aller plus loin dans l'analyse des résultats (tableau 4.3). Elle comprend quatre colonnes principales: deux pour calculer les deux effets, une pour calculer l'interaction et une pour le calcul de la moyenne. Pour la présentation on ajoute une colonne indiquant le numéro de chaque essai et une colonne donnant la réponse pour chacun des essais. Au bas de chaque colonne, on rappelle le diviseur utilisé et l'on indique le résultat.

La moyenne a_0 des réponses, considérée comme la valeur de la réponse au centre du plan c'est à dire, lorsque tous les facteurs sont au niveau zéro, s'écrit:

$$a_0 = \frac{1}{4}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)$$

Tableau 3 : matrice des effets

N°essai	Moyenne	Facteur 1	Facteur 2	Interaction 1 2
1	+1	-1	-1	+1
2	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	+1
diviseur	4	4	4	4
effets	23.82	8.31	3.76	4.35

Remarques:

Les éléments de la colonne de l'interaction s'obtiennent en faisant le produit des éléments correspondants des colonnes des facteurs.

Nous verrons par suite que le modèle mathématique représentant l'exemple du circuit imprimé à l'intérieur du domaine expérimental s'écrit en coordonnées centrées réduites:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2$$

$$y = 23.82 + 8.31 x_1 + 3.76 x_2 + 4.35 a_{12} x_1 x_2$$

où

a0 moyenne

a1 effet de la dimension de l'outil

a2 effet de la vitesse de découpage

a12 interaction entre les facteurs

La matrice des effets permet alors de retrouver tous les coefficients en faisant le produit scalaire de la colonne correspondante avec la colonne des réponses puis en divisant par 4.

$$a_0 = \frac{1}{4}(+y_1 + y_2 + y_3 + y_4)$$

$$a_1 = \frac{1}{4}(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4)$$

$$a_2 = \frac{1}{4}(-y_1 - y_2 + y_3 + y_4)$$

$$a_{12} = \frac{1}{4}(+y_1 - y_2 - y_3 + y_4)$$

1.2.3 Calcul des effets par la méthode matricielle:

Le modèle mathématique retenu est donné par la relation:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (4-9)$$

Si on remplace x_1 et x_2 par leurs valeurs en coordonnées centrées réduites (-1 ou +1), on obtient le système:

$$y_1 = a_0 - a_1 - a_2 + a_{12}$$

$$y_2 = a_0 + a_1 - a_2 + a_{12}$$

$$y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_{12}$$

$$y_4 = a_0 + a_1 + a_2 + a_{12}$$

Qui s'écrit sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_{12} \end{pmatrix}$$

Soit

$$y = Xa \quad (4.10)$$

Où y est le vecteur de réponses et X est la matrice de calcul. Le vecteur a des effets est l'inconnue

$$a = X^{-1}y \quad (4.11)$$

X est une matrice d'Hadamard qui vérifie les propriétés suivantes: elle est carrée, ses éléments sont uniquement des -1 et +1, elle est orthogonale et vérifie la relation

$$X^{-1} = \frac{1}{N} X^t \quad \text{matrice inverse de X; } X^t \text{ transposée de X}$$

Dans notre exemple:

$$A = X^{-1} y = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & -1 & +1 \\ -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 16.10 \\ 24.02 \\ 14.92 \\ 40.27 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 23.82 \\ 8.31 \\ 3.76 \\ 4.35 \end{pmatrix}$$

Le modèle devient:

$$y = 23.82 + 8.31x_1 + 3.76x_2 + 4.35x_1x_2$$

1-2-4 points expérimentaux décalés par rapport aux sommets du domaine d'étude.

Lorsque les points expérimentaux ne coïncident plus avec les sommets du domaine d'étude, la méthode classique n'est plus utilisable. Le calcul matriciel est le seul moyen d'obtenir les valeurs des effets et des interactions. Supposons que les points expérimentaux A B C et D sont à l'intérieur du domaine d'étude (figure 9)

$$A \begin{cases} 1/16'' \\ 42 \text{ tr/min} \end{cases} \quad B \begin{cases} 1/10'' \\ 45.5 \text{ tr/min} \end{cases} \quad C \begin{cases} 1/13'' \\ 86 \text{ tr/min} \end{cases} \quad D \begin{cases} 1/8'' \\ 90 \text{ tr/min} \end{cases}$$

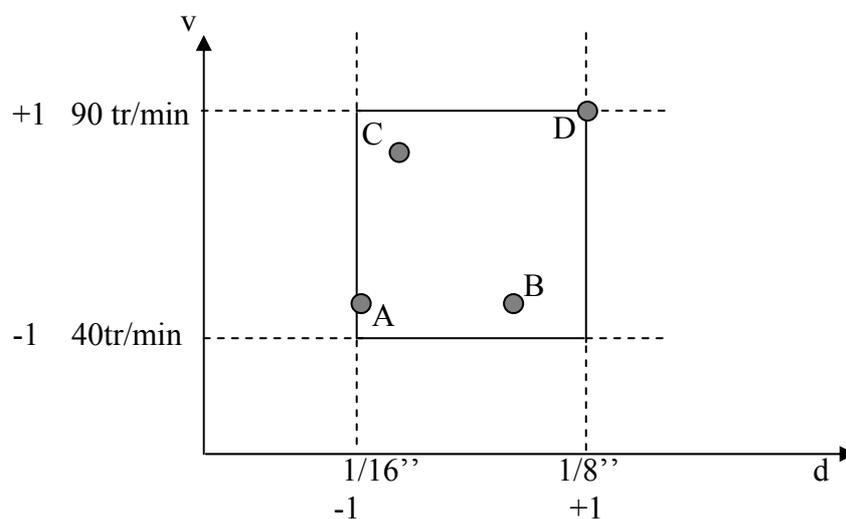


Figure 9 : Points expérimentaux décalés

Coordonnées centrées réduites (formule 4.4)

$$A \begin{cases} -1 \\ -0.92 \end{cases} \quad B \begin{cases} +0.22 \\ -0.78 \end{cases} \quad C \begin{cases} -0.52 \\ +0.84 \end{cases} \quad D \begin{cases} +1 \\ +1 \end{cases}$$

D'ou le tableau:

Tableau 4 matrice calcul des effets

N°essai	Moyenne	Facteur 1	Facteur 2	Interaction 1 2
1	-1	-0.92	0.92	y=16.05
2	0.22	-0.78	-0.17	y=21.96-1
3	-0.52	0.84	-0.43	y=20.75
4	+1	+1	+1	y=40.27

Niveau -	1/16"	40 tr/min
Niveau +	1/8"	90 tr/min

$$y=Xa$$

$$\begin{pmatrix} 16.05 \\ 21.96 \\ 20.75 \\ 40.27 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1 & -1 & -0.92 & +0.92 \\ +1 & +0.22 & -0.78 & -0.17 \\ +1 & -0.52 & +0.84 & -0.43 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_{12} \end{pmatrix}$$

La matrice des effets sera donc:

$$a=X^{-1}y = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ y_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 23.82 \\ 8.31 \\ 3.76 \\ 4.35 \end{pmatrix}$$

Bien que les points expérimentaux ne soient pas aux sommets du domaine d'étude, nous obtenons les mêmes effets.

Technique du "un facteur à la fois"

Elle consiste à fixer tous les facteurs sauf un, à des valeurs constantes. L'expérimentation est alors conduite en donnant plusieurs niveaux au facteur étudiés. La réponse choisie est mesurée pour chacun des niveaux de ce premier facteur et l'on trace la courbe de la réponse y en fonction du facteur étudié. Le premier facteur ayant été étudié, on recommence la même procédure avec le deuxième facteur et ainsi de suite avec tous les autres facteurs. Sans parler du grand nombre d'essais qu'il faut réaliser, cette technique n'est pas optimale. Un autre gros inconvénient est que les interaction entre les facteurs sont complètement ignorées.

1.3 Plans factoriels complets à deux niveaux et k facteurs 2^k

Le modèle mathématique cherché se présente sous la forme d'une relation entre la réponse et les facteurs étudiés :

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (4.12)$$

Nous ne disposons d'aucune information sur la forme de cette équation. Rien n'interdit d'utiliser toutes les fonctions mathématiques connues, pour essayer de modéliser les résultats d'une série d'essai. Devant cette diversité de forme que l'on peut proposer pour la fonction $y=f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, il en est une qui reste mathématiquement valable dans tous les cas. C'est celle du développement limite en série de Taylor à k variable. C'est cette dernière forme qui a été retenue par des plans d'expériences afin d'interpréter les résultats des essais

Lorsque nous avons k facteurs, le modèle mathématique s'écrit :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (4.13)$$

Où a_0 moyenne des réponses au centre du domaine d'étude

a_i effet du facteur i

$a_{ij} \dots k$ interaction entre les facteurs pris deux à deux, trois à trois, ... k à k

1.4 Plans factoriels fractionnaires

Lorsque le nombre de facteurs devient supérieur à trois, le nombre d'essais devient vite important. Pour remédier à cet inconvénient, on utilise les plans factoriels fractionnaires à deux niveaux 2^{k-p} . Ces plans sont très utiles car ils permettent de diminuer considérablement le nombre d'expériences. On étudie pratiquement k facteurs en ne faisant que 2^{k-p} essais. Pour interpréter correctement les résultats de tels plans, il faut connaître la théorie des alias.

1.4.1 Théorie des alias

Reprenons le dernier exemple. Au lieu d'effectuer les huit essais du plan factoriel complet 2^3 , on étudie les 3 facteurs en ne réalisant que la moitié des essais soit $2^{3-1} = 4$ essais. Les quatre expériences 5, 2, 3 et 8 sont choisies de manière que les points représentatifs se projettent aux quatre sommets de chaque face du cube définissant le domaine d'étude (figure 10)

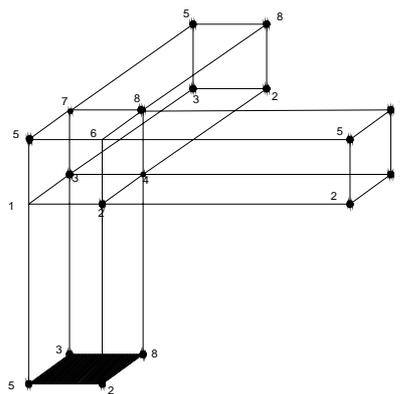


Figure 10 : Plan fractionnaire 2^{3-1}

La matrice d'expériences du plan fractionnaire est donnée par le tableau 4-7 où les points ont été volontairement mis dans l'ordre 5, 2, 3 et 8

Tableau 4-7 Matrice d'expériences du demi plan fractionnaire supérieur

N°essai	Facteur1	Facteur2	Facteur3	Réponses
5	-1	-1	+1	Y5= 3.64
2	+1	-1	-1	Y2= 1.22
3	-1	+1	-1	Y3= 5.56
8	+1	+1	+1	Y8= 2.34

Contrastes -1.41 0.76 -0.2

Pour calculer les effets, on applique la même méthode que pour les plans complets. On peut comparer les effets calculés à partir de ce plan fractionnaire à ceux obtenus avec le plan complet (tableau 8).

Tableau 8 Comparaison des effets calculés

	Plan Complet	Plan fractionnaire
Moyenne	3.25	3.19
1	-1.43	-1.41
2	0.78	0.76
3	-0.14	-0.20

Pour le plan fractionnaire nous avons calculé ce qu'on appelle les contrastes [21]. Si nous appelons a_1 l'effet principal du facteur 1 et a_{23} l'interaction entre les deux facteurs 2 et 3 du plan complet 2^3 , on remarque que le contraste l_1 du facteur 1 est :

$$l_1 = a_1 + a_{23} = -1.41 \quad (4.14)$$

En effet :

$$l_1 = \frac{1}{4} (-y_5 + y_2 - y_3 + y_8)$$

$$a_1 = \frac{1}{8} (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8)$$

$$a_{23} = \frac{1}{8} (y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8)$$

On dit que a_1 et a_{23} sont aliasés dans le contraste l_1 . On verra de même que :

$$l_2 = a_2 + a_{13} = 0.76$$

$$l_3 = a_3 + a_{12} = -0.2$$

Le modèle du plan fractionnaire 2^{3-1} s'écrit :

$$y = l_0 + l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3 x_3$$

Ou

$$l_0 = \frac{1}{4} (y_5 + y_2 + y_3 + y_8)$$

$$l_0 = a_0 + a_{123} = 3.19$$

Reprenons la matrice de calcul des effets du plan complet 2^3 et ordonnons les essais de manière à faire apparaître les deux groupes de plans fractionnaire 2^{3-1} (5, 2, 3 et 8 pour le demi plan supérieur et 1, 6, 7 et 4 pour le demi plan inférieur) (tableau 9).

Tableau 9 : Matrice de calcul des effets pour les deux demi – plans fractionnaires

N° essai	I	Facteur1	Facteur2	Facteur3	12	13	23	123	Plan
5	1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Demi-plan supérieur
2	1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	
3	1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	
8	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	
1	1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Demi-plan inférieur
6	1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	
7	1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	
4	1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	

On remarque que le demi plan supérieur possède huit colonnes égales deux à deux. Par exemple, la colonne des quatre signes du facteur 1 est égale à celle de l'interaction 23, soit

$$I = 23 \quad (4.15)$$

Si l'on rapproche cette relation avec la relation (4.17) on peut écrire :

$$I = 23 \text{ est équivalent à } I_1 = a_1 + a_{23}$$

Cette relation d'équivalence est valable dans les deux sens et elle constitue la base de la théorie des aliases. On montrerait de même que :

$$2=I3 \text{ est équivalent à } I_2 = a_2 + a_{13}$$

$$3=I2 \text{ est équivalent à } I_3 = a_3 + a_{12}$$

On peut trouver toutes ces relations en écrivant que les deux colonnes de signes plus sont égales :

$$I = I_1 23 \quad (4.16)$$

Puis en multipliant successivement cette relation appelée le générateur des aliases :

$$1. I = I_1. I_2 23 = I_1^2 23 \quad I_1 = 23$$

$$2. I = I_2. I_3 23 = I_2^2 3 \quad I_2 = 13$$

$$3. I = I_3. I_2 23 = I_3^2 23 \quad I_3 = 12$$

1.4.2 Hypothèses d'interprétation

Les plans fractionnaires nécessitent l'utilisation des hypothèses suivantes :

Hypothèse 1

Les interactions du troisième ordre ou d'ordre plus élevés sont considérées comme négligeable. on élimine ainsi un grand nombre d'inconnues.

Hypothèse 2

Si un contraste est nul, cela peut signifier que :

- Les effets et les interactions aliasés sont tous nuls, cette hypothèse est la plus probable et c'est celle qui est retenue
- Les effets et les interactions aliasés se compensent. Cette hypothèse est peu probable, elle n'est pas retenue.

Hypothèse 3

- Si deux contrastes sont faibles, on supposera que leur interaction l'est aussi
- Si un contraste est faible et l'autre fort, on supposera que leur interaction est faible.

Hypothèse 4

- Si deux contrastes sont forts, on se méfiera de leur interaction qui peut l'être également

1.5 Différents plans d'expériences

1.5.1 Plans Koshal

Les plans Koshal utilisent la technique de " un facteur à la fois ". Il faut y penser lorsque l'on cherche à débroussailler un problème comportant beaucoup de facteurs et que l'on pense, pour des raisons techniques ou scientifiques, qu'il n'y a pas d'interactions. Les plans de Koshal sont des plans qui permettent de déterminer uniquement les effets principaux des facteurs. Le modèle mathématique s'écrit :

$$\sum a_i x_i$$

$$y = a_0 +$$

La figure 11 illustre un plan de Koshal pour trois facteurs.

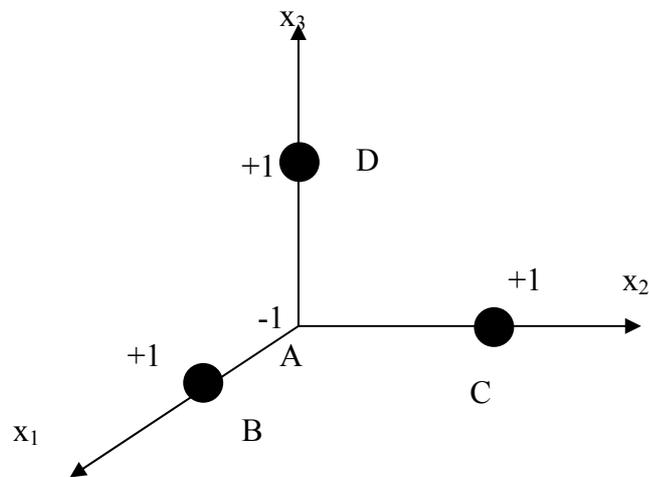


Figure 11 : Plan de Koshal pour trois facteurs

1.5.2 Plan de Plackett et Burman

Les plans de Plackett et Burman sont des plans factoriels fractionnaires qui permettent de déterminer les effets principaux de k facteurs en réalisant $k+1$ essais. Ils ne permettent pas d'évaluer les interactions. Le modèle mathématique est un modèle sans interactions analogue à celui des plans de Koshal.

$$y = a_0 + \sum a_i x_i$$

1.5.2 Plan de Rechtschffner

Ces plans sont des plans fractionnaires simplifiés qui permettent de déterminer les effets principaux des facteurs et les interactions d'ordre deux. Le modèle mathématique est :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j$$

1.5.3 Plans sursaturés

Le plan sursaturé est un plan qui comporte moins d'essais que de coefficients à déterminer dans le modèle mathématique. Ces plans sont utiles lorsqu'il y a beaucoup de facteurs à examiner et lorsqu'on est sûr que peu d'entre eux sont influents sur la réponse.

1.5.4 Plans pour surfaces de réponses

L'équation correspondante est représentée par une équation du second degré, faisant intervenir aussi bien les effets principaux que les interactions. Pour deux facteurs nous avons :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2$$

Ces plans sont utiles à chaque fois que l'on se trouve près d'un maximum ou d'un minimum. Toute la théorie développée pour les plans précédents s'applique aussi pour les modèles du second degré. Parmi ces plans, nous avons utilisé dans notre travail les plans de Doehlert

1.5.4 Plans de Doehlert

La caractéristique principale des plans de Doehlert est d'avoir une répartition uniforme des points expérimentaux dans l'espace expérimental. La figure 12 donne la disposition de ces points pour un plan à deux facteurs (essais 1 à 7). Tous les points sont à la même distance du centre du domaine d'étude, ils forment un hexagone régulier.

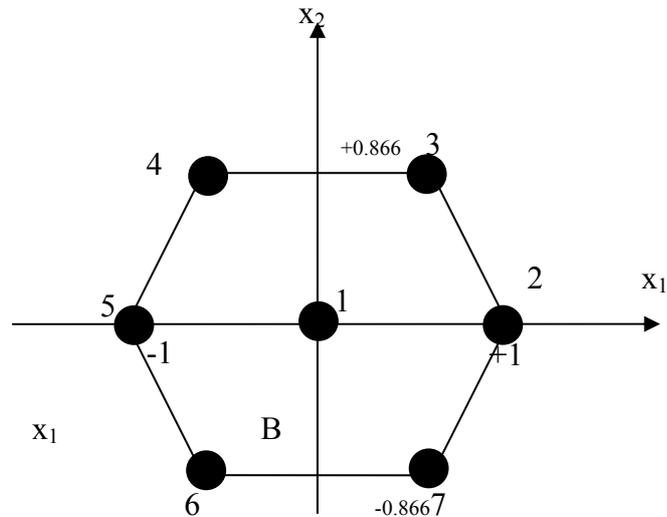


Figure 12 plans de Doehlert à deux facteurs

1.5.5 Table de Taguchi, de Box et de Plackett et Burman

Les plans incomplets orthogonaux peuvent être construits à partir de tables existantes prêtes à l'emploi. Pour un type de plan donné, on identifie la table appropriée à la construction du plan d'expérience. Ces tables permettent de répondre à un maximum de situations. Les tables sont repérées par l'un des sigles : $L_q(p)_n$ pour les tables de Taguchi ou $S_q(p)_n$ pour celle établies par d'autres auteurs comme Box, Plackett et Burman ou :

- q est le nombre de combinaisons des plans pouvant être obtenu
- n est le nombre de colonne qui pourront être affectées en tout ou partie aux facteurs et aux interactions
- p est le nombre de niveaux des facteurs

1-6 Evaluation de la qualité d'un modèle

Une fois le modèle choisi, les expériences réalisées et les coefficients de ce modèle calculés, la question qui reste posée est la suivante : “ est-ce que le modèle, ainsi déterminé, représente bien les résultats expérimentaux ?” .Il faut donc évaluer la qualité de cette représentation. Quatre techniques sont utilisées pour effectuer cette évaluation : l'examen graphique, l'analyse des variances, les tests statistiques ou enfin l'analyse des

résidus. Mais avant d'expliquer ces quatre méthodes d'évaluation de la qualité d'un modèle, il est indispensable de définir les trois différents écarts qui entrent en jeu.

B- PLAN D'EXPERIENCES CHOISI ET ENSEMBLE DES RESULTATS

Tableau 10 : Plan d'expériences retenu pour les simulations

N° ESSAI	H (m)	X(m)	N _x	Y(m)	N _y	a(cm)
1	18.36	3	3	3	3	30
2	9.18	5	3	5	2	30
3	12.24	5	6	5	2	30
4	15.30	3	6	3	3	30
5	18.36	5	3	5	2	30
6	9.18	3	3	3	3	30
7	12.24	3	6	3	3	30
8	15.30	5	6	5	2	30
9	18.36	5	3	3	2	30
10	9.18	3	3	5	3	30
11	12.24	3	6	5	3	30
12	15.30	5	3	3	2	30
13	18.36	3	3	5	3	30
14	9.18	5	3	3	2	30
15	12.24	5	6	3	2	30
16	15.30	3	6	5	3	30
17	18.36	3	6	3	2	40
18	9.18	5	3	5	3	40
19	12.24	5	3	5	3	40
20	15.30	3	3	3	2	40
21	18.36	5	6	5	3	40
22	9.18	3	6	3	2	40
23	12.24	3	3	3	2	40
24	15.30	5	3	5	3	40
25	18.36	5	6	3	3	40
26	9.18	3	6	5	2	40
27	12.24	3	3	5	2	40
28	15.30	5	3	3	3	40
29	18.36	3	6	5	2	40
30	9.18	5	6	3	3	40
31	12.24	5	3	3	3	40
32	15.30	3	3	5	2	40

X : distance entre axes des poteaux suivant l'axe x,

Y : distance entre axes des poteaux suivant l'axe y,

N_x : nombre des entres axes suivant l'axe x,

N_y : nombre des entres axes suivant l'axe y,

A : dimensions des poteaux,

H : hauteur du bâtiment.

Tableau 11 : Période fondamentale et déplacements obtenus

N° essais	T (s)	δ_x (cm)	δ_y (cm)
1	0.53	1.96	1.79
2	0.30	0.7	0.7
3	0.51	1.44	1.96
4	0.57	2	1.96
5	0.75	3.51	3.48
6	0.33	0.37	0.33
7	0.44	1.32	1.29
8	0.68	2.38	2.92
9	0.63	2.77	1.87
10	0.32	0.54	0.69
11	0.56	1.75	1.92
12	0.50	2.02	1.2
13	0.75	2.45	2.98
14	0.25	0.48	0.33
15	0.49	1.82	1.7
16	0.71	2.45	2.69
17	0.50	1.54	1.68
18	0.31	0.76	0.63
19	0.45	1.64	1.3
20	0.34	0.84	0.76
21	0.84	3.2	3.9
22	0.22	0.3	0.33
23	0.26	0.48	0.43
24	0.59	2.6	2.14
25	0.60	2.45	2.28
26	0.32	0.41	0.67
27	0.28	0.48	0.56
28	0.49	1.88	0.98
29	0.70	1.9	2.74
30	0.27	0.55	0.52
31	0.37	1.12	0.62
32	0.37	0.8	0.98

- T : période fondamentale,
- δ_x : déplacements suivant l'axe x,
- δ_y : déplacements suivant l'axe y.

Tableau 12 : Effort normal maximal et moment fléchissant correspondant dans les poteaux

N° ESSAI	N_{\max} (t)	M_{cor} (t.m)	M_{\max} (t.m)	N_{cor} (t)
1	44.2	2.4	5.6	21.7
2	48.2	2	4.4	1.7
3	65.6	8	20.9	53.7
4	81.5	4	8.5	41.2
5	113	3.5	12.2	0.33
6	23	1.1	2.3	3.8
7	66	3.4	7	31.6
8	94.7	10.3	24	71.6
9	59.1	2.26	8.6	9.65
10	33.4	2	3.7	6.3
11	85.4	4.2	10.4	48.7
12	55.3	2	6.6	7.9
13	67.9	3.3	7.8	32.7
14	33	0.9	3.1	2.6
15	54.05	2.22	8.44	12.07
16	104.5	6.6	11.9	63.8
17	79.2	5.08	12.2	17.2
18	60.8	5.6	12.2	14.6
19	82.6	7.5	14.5	14.6
20	41.7	3.1	6.05	13.6
21	143.34	11.94	19.4	72.9
22	31.1	2.5	4.7	1.9
23	30.7	2.3	4.4	10.1
24	103.7	8.8	16.1	14.6
25	127.2	9.2	17	33.4
26	44.8	4.3	7	5.2
27	29.8	2.9	4.03	2.6
28	71.6	4.7	8.5	7.2
29	86.3	6.5	11.4	30
30	56.4	4.8	7.3	46.1
31	58.8	4.2	6.9	7
32	39.2	2.5	4.95	2.6

- N_{\max} : effort normal maximal,
- M_{cor} : moment correspondant,
- N_{cor} : effort normal correspondant,
- M_{\max} : moment maximal.

Tableau 13 : Moment fléchissant dans les poutres

N° Essais	Poutres porteuses		Poutres secondaires	
	M_t (t.m)	M_a (t.m)	M_t (t.m)	M_a (t.m)
1	8	8.82	3.6	6.02
2	5.4	6.07	2.3	4.08
3	8.96	9.71	8.89	10.62
4	10.02	10.96	8.16	8.94
5	9.36	11.76	5.22	7.09
6	3.03	3.59	3.56	4.34
7	7.89	8.72	6.05	6.72
8	5.35	6.11	3.65	4.95
9	9.75	11.1	4.61	5.95
10	4.91	5.53	5.26	5.1
11	8.35	8.92	8.44	9.28
12	7.45	8.53	3.74	4.62
13	9.98	10.62	9.41	10.7
14	3.41	4.36	1.8	2.5
15	5.25	6.25	3.2	4.23
16	10.02	10.96	10.02	10.96
17	10.45	10.45	6.8	6.65
18	9.1	17.2	2.7	4.1
19	9.05	17.11	4.9	5.8
20	5.33	5.87	2.1	2.15
21	9.5	10.3	5.4	7.4
22	3.83	4	3.29	3.2
23	5	5.6	3.74	3.9
24	10.9	18.8	6.43	7.47
25	12	17	6.2	7.02
26	3.8	4.31	4.32	4.23
27	6.72	7.7	6.3	6.6
28	9.3	10.3	5.4	6.7
29	12.02	13.36	9.43	9.66
30	18.2	22	14	25
31	6.75	7.5	3.6	4.6
32	8.6	11.23	8.5	9.1

- M_t : moment en travée,
- M_a : moment en appuis.

Tableau 14 : Ensemble des simulations considéré pour l'évaluation des corrélations

N° Essais	H (m)	X (m)	N _x	Y (m)	N _y	a (cm)
1	18.36	3	3	3	3	30
2	9.18	3	3	3	3	30
3	12.24	3	3	3	3	30
4	15.30	3	3	3	3	30
5	18.36	3	3	3	3	40
6	9.18	3	3	3	3	40
7	12.24	3	3	3	3	40
8	15.30	3	3	3	3	40
9	18.36	3	3	3	2	30
10	9.18	3	3	3	2	30
11	12.24	3	3	3	2	30
12	15.30	3	3	3	2	30
13	18.36	3	3	3	2	40
14	9.18	3	3	3	2	40
15	12.24	3	3	3	2	40
16	15.30	3	3	3	2	40
17	18.36	3	6	3	3	30
18	9.18	3	6	3	3	30
19	12.24	3	6	3	3	30
20	15.30	3	6	3	3	30
21	9.18	3	6	3	3	40
22	12.24	3	6	3	3	40
23	9.18	3	6	3	2	30
24	12.24	3	6	3	2	30
25	15.3	3	6	3	2	30
26	18.36	3	6	3	2	40
27	9.18	3	6	3	2	40
28	12.24	3	6	3	2	40
29	15.3	3	6	3	2	40
30	9.18	3	3	5	3	30
31	12.24	3	3	5	3	30
32	15.3	3	3	5	3	30
33	18.36	3	3	5	3	40
34	9.18	3	3	5	3	40
35	12.24	3	3	5	3	40
36	15.3	3	3	5	3	40
37	18.36	3	3	5	2	30
38	9.18	3	3	5	2	30
39	12.24	3	3	5	2	30
40	15.3	3	3	5	2	30
41	18.36	3	3	5	2	40
42	9.18	3	3	5	2	40
43	12.24	3	3	5	2	40
44	15.3	3	3	5	2	40
45	12.24	3	6	5	3	30
46	15.3	3	6	5	3	30
47	9.18	3	6	5	3	40
48	9.18	3	6	5	2	30
49	12.24	3	6	5	2	30
50	15.3	3	6	5	2	30

N° Essais	H (m)	X (m)	N _x	Y (m)	N _y	a (cm)
51	18.36	3	6	5	2	40
52	9.18	3	6	5	2	40
53	12.24	3	6	5	2	40
54	15.3	3	6	5	2	40
55	18.36	5	3	3	3	30
56	9.18	5	3	3	3	30
57	12.24	5	3	3	3	30
58	15.3	5	3	3	3	30
59	18.36	5	3	3	3	40
60	9.18	5	3	3	3	40
61	12.24	5	3	3	3	40
62	15.3	5	3	3	3	40
63	18.36	5	3	3	2	30
64	9.18	5	3	3	2	30
65	12.24	5	3	3	2	30
66	15.3	5	3	3	2	30
67	18.36	5	3	3	2	40
68	9.18	5	3	3	2	40
69	12.24	5	3	3	2	40
70	15.3	5	3	3	2	40
71	18.36	5	6	3	3	30
72	9.18	5	6	3	3	30
73	12.24	5	6	3	3	30
74	15.3	5	6	3	3	30
75	18.36	5	6	3	3	40
76	9.18	5	6	3	3	40
77	18.36	5	6	3	2	30
78	9.18	5	6	3	2	30
79	12.24	5	6	3	2	30
80	15.3	5	6	3	2	30
81	9.18	5	6	3	2	40
82	12.24	5	6	3	2	40
83	15.3	5	6	3	2	40
84	9.18	5	3	5	3	30
85	12.24	5	3	5	3	30
86	15.3	5	3	5	3	30
87	9.18	5	3	5	3	40
88	12.24	5	3	5	3	40
89	15.3	5	3	5	3	40
90	9.18	5	3	5	2	30
91	12.24	5	3	5	2	30
92	15.3	5	3	5	2	30
93	9.18	5	3	5	2	40
94	12.24	5	3	5	2	40
95	9.18	5	6	5	3	30
96	12.24	5	6	5	3	30
97	18.36	5	6	5	3	40
98	9.18	5	6	5	3	40
99	12.24	5	6	5	2	30
100	15.3	5	6	5	2	30

Tableau 15 : Effort normal et Moment fléchissant obtenus

N° Essais	Efforts			
	N_{\max} (t)	M_{corr} (t.m).	M_{\max} (t.m)	N_{corr} (t)
1	44.2	2.4	5.6	21.7
2	23	1.1	2.3	3.8
3	31.2	1.6	3.3	4.2
4	38	2	4.5	16
5	46.7	5.2	7.4	23.3
6	25	2	3.3	3.8
7	32.6	3.3	4.3	4.03
8	40	4.2	5.8	16.6
9	38.8	1.2	5.5	9.3
10	19.4	1	2	2.7
11	22.3	0.9	3	7.6
12	31.3	1.5	4.2	7.3
13	53.8	3.35	7.7	16.5
14	21.1	1.7	3.1	2.3
15	30.7	2.3	4.4	10.1
16	41.7	3.1	6.05	13.6
17	89.6	3.7	9.03	47.2
18	43.7	2.1	4.8	20
19	66	3.4	7	31.6
20	81.5	4	8.5	41.2
21	46.6	4	7	24.2
22	67.5	5.4	10.2	36.7
23	24.5	1.08	3.3	5.3
24	35.5	1.5	5.07	8
25	47.6	2	6.78	10.3
26	79.2	5.08	12.2	17.2
27	31.1	2.5	4.7	1.9
28	45.7	3.5	7.2	10.4
29	61.7	4.4	9.7	13.8
30	33.4	2	3.7	6.3
31	46.3	2.64	5.35	7.48
32	57.3	3	6.9	25.8
33	84.9	5.6	10.7	34.8
34	38.2	3.11	5.1	6.7
35	55.1	4.4	7	7
36	70.6	5.35	8	7.15
37	34.9	1.1	4.6	12.1
38	15.4	0.5	1.9	2.5
39	21.3	0.74	2.77	2.5
40	27.8	0.9	3.5	9
41	49.5	3.05	6.05	14.4
42	21.5	1.4	3	2.7
43	29.8	2.9	4.03	2.6
44	39.2	2.5	4.95	2.6
46	104.5	6.6	11.9	63.8
47	62	6.02	10.8	35.8
48	36.5	1.9	5.3	5.1
49	50.9	2.6	7.1	5.1
50	60.1	2.6	7.9	18

N° Essais	Efforts			
	N _{max} (t)	M _{cor} (t.m).	M _{max} (t.m)	N _{corr} (t)
51	86.3	6.5	11.4	30
52	44.8	4.3	7	5.2
53	63.2	5.8	9.2	5.2
54	83.1	7.5	10.4	25.6
55	46.7	1.6	5.4	21
56	33.9	1.4	3.3	6.7
57	45.2	1.9	5.06	7.3
58	50.2	1.76	6.1	7.47
59	69.1	4.5	8	27
60	41	3.07	4.6	6.5
61	58.8	4.2	6.9	7
62	71.6	4.7	8.5	7.2
63	59.1	2.26	8.6	9.65
64	33	0.9	3.1	2.6
65	45	1.5	4.7	5.9
66	55.3	2	6.6	7.9
67	84.2	5.4	13.3	15.8
68	35.1	2.7	5.2	3.3
69	50	3.4	7.07	12.01
70	66.7	4.9	9.9	11.1
71	91.7	3.8	11	38.8
72	49.1	2.3	5.3	11.1
73	69	3.15	7.7	10.4
74	84.9	3.7	10	23.5
75	127.2	9.2	17	33.4
76	56.4	4.8	7.3	46.1
77	73.03	2.54	11.73	13.52
78	38.34	1.56	5.73	9.61
79	54.05	2.22	8.44	12.07
80	64.64	2.51	10.35	10.97
81	46.3	3.4	8.2	4.92
82	66.69	4.7	12.27	17.1
83	89.26	6.23	16.37	21.34
84	62.1	2.8	7.9	14.8
85	87.3	3.7	9.8	14.9
86	102.07	4	10.1	12.8
87	60.8	5.6	12.2	14.6
88	82.6	7.5	14.5	14.6
89	103.7	8.8	16.1	14.6
90	48.2	2	4.4	1.7
91	64.9	2.7	7.75	6.4
92	94.9	3.3	9.45	6.1
93	48.3	4.13	7.3	9.3
94	75.1	5.9	11.1	6.7
95	75.04	3.73	9	13.11
96	90.54	4.29	10.89	43.64
97	143.34	11.94	19.4	72.9
98	83.51	8.05	11.7	11.7
99	94.7	10.3	24	71.6
100	99.6	11.1	25.7	81.6

Tableau 16 : Effort tranchant à la base

N° Essais	Efforts tranchant à la base	
	Suivant l'axe x V_x (t)	Suivant l'axe y V_y (t)
1	760.95	751.68
2	424.45	422.08
3	556.53	559.32
4	690.37	703.71
5	918.18	877.09
6	467.86	462.42
7	616.95	612.54
8	767.77	766.76
9	574.68	530.24
10	304.2	287.8
11	399.47	389.14
12	496.15	492.41
13	663.58	628.19
14	336.53	323.57
15	444.27	423.13
16	469.45	527.13
17	1270.02	1199.16
18	755.43	750.03
19	991.11	987.44
20	1210.54	1138.85
21	828.72	818.3
22	1094.32	1082.26
23	600	628.5
24	817.22	826.28
25	1003.33	1023.4
26	1322.51	1346.79
27	710.21	703.49
28	903.44	909.95
29	1112.89	1129.51
30	598.56	549.94
31	787.49	688.3
32	919.75	718.41
33	1152.2	855.31
34	643.96	589.79
35	849.51	793.56
36	1055.05	815.15
37	950.23	926.24
38	494.54	517.37
39	668.91	704.84
40	850.51	868.32
41	1076.48	1027.21
42	520.06	536.75
43	700.82	728.75
44	901.62	934.72
45	1451.8	1178.39
46	1558.34	1251.64
47	828.72	818.3
48	888.24	871.84
49	1150.87	1134.36
50	1409.64	1394.4

N° Essais	Efforts tranchant à la base	
	Suivant l'axe x V_x (t)	Suivant l'axe y V_y (t)
51	1814.53	1781.58
52	955.4	929.45
53	1248.36	1218.17
4	1538.45	1506
55	887.65	1056.6
56	536.65	555.55
57	701.66	728.45
58	857.72	925.38
59	1015.5	1210.96
60	576.46	605.83
61	758.74	799.04
62	975.13	993.64
63	579.93	1002.27
64	302.73	318.06
65	447.11	473.84
66	523.53	535.18
67	666.91	722.08
68	331.28	351.26
69	447.06	473.73
70	562.7	596
71	1754.82	1508.14
72	1018.31	901.17
73	1516.31	1266.19
74	1654.12	1406.7
75	2200.18	1809.68
76	1192.28	994.16
77	1421.05	1511.02
78	735.4	765.08
79	953.35	1026.7
80	1236.35	1269.03
81	787.71	812.86
82	1082.58	1093.42
83	1328.47	1364.67
84	736.89	753.54
85	971.79	897.94
86	1032.83	1117.64
87	740.97	799.31
88	1028.18	1053.54
89	1171.95	1305.56
90	349.89	387.65
91	484.2	537.65
92	602.23	688.67
93	377.7	407.99
94	525.09	550.81
95	1616.54	1277.12
96	2003.49	1471.74
97	2786.35	2171.81
98	1868.35	1420.96
99	1577.89	1646.47
100	2026.89	2002.27

REFERENCES

1. Molina A., Ellis Tia, Young Rim, Bell R., «Method and Tools for Modelling Manufacturing Information to Support Simultaneous Engineering », Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Vienna, Austria, pp. 95-101, 13-15, June 1994.
2. Prasad B., «CE plus CIM Equals IIS, Intelligent Information System », Engineering Data Management and Emerging Technologies, ASME, 1995.
3. S. Szykman, R.S.C. Bochenek, J. Racz and J.W. Murdock, «An Information Modelling Framework to Support Design Database and Repositories », NIST Repository Project, National Manufacturing Technology Conference, Apr, 1997.
4. A. Attar, L. Pecora, R. DiRaddo, K. Amellal, H. Atshaba, L. Savoni, «Conceptual design methodology for assisting in the development of blow moulded tanks », Rapport Technique, National Research Council, Canada, 1999.
5. R. DiRaddo, A. Attar, «Model-Based Diagnosis for reducing the development time and improving the quality of forming parts », EIS 2000 Second international symposium, Engineering of intelligent systems, 29 Jun -2 Jul 2000, Scotland (UK).
6. V. Davidovici, « La construction en zone sismique », Editions Le Moniteur, Paris ,1999.
7. A. Capra, V. Davidovici, «Calcul dynamique des structures en zone sismique », Editions Eyrolles, 3e édition, Paris, 1984.
8. Jacques Betbeder-Matibet, «Prévention Parasismique », vol. 2, Lavoisier, Paris, 2003.
9. Jaques Betrbeder-Matibet, «Risques et aléas sismiques », Hermès science publications, Paris, 2003.
10. Ray W. Clough, J. Penzien, «Dynamique des structures », Tome 1: Principes fondamentaux, Edition Pluralis, 1980.
11. Albert Fuentes, «Bâtiment en zone sismique », Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées, Paris, 1998.

12. André Filiatrault, «element of earthquake engineering and structural dynamics », école polytechnique de Montreal, 2002.
13. Association française de Génie Parasismique- Recommandation AFPS 90, Presses des Ponts et Chaussées, 1990.
14. Règles Parasismiques Algériennes RPA99/version 2003, Document technique réglementaire D.T.R- B-C.2.48.
15. Commission of the european Communautés Eurocode 8 CEN/TC250/SC8 Part 1-1, 1993.
16. Chong-Yul Yoon, «Object Oriented Paradigms for Computer Aided Structural Engineering, thèse de doctorat, University of California at Berkeley, 1990.
17. Yves-Dominiquye Dubois-Pelerin, «Object– Oriented Finit Elements Programming Concepts And Implementation », thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 1992.
18. Ronald Foefch, «Un Environnement Orienté objet Pour la Modélisation numérique des Matériaux en Calcul de structures », thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Paris, 1996.
19. David R.C. Hill, «Analyse orientée objets & modélisation par simulation », Addison Wesley. 1992.
20. David. A, «Technologie orientée objet », Taylor Addison-Wesley - Diffusion Bordas, 1992.
21. Jacques Ferber, «Conception et programmation par objets », HERMES, 1996.
22. Nino Silverio, «Passage du C au C++, programmation orientée objet », Eyrolles , 1993.
- 23 Robert Lafore, «Objetc-Oriented Programming in C++ », Third Edition, Sams Publishing, 1999.
24. Blaha M. EDDY F. Lorensen W. Premerlani W, «Object Oriented Modelling and Design », Prentice Hall, 1998.
25. Booch G, «Conception Orientée Objets et applications », Addison Wesley, 1992.
26. Coad P. Yourdon E, «Object-Oriented Analyse », Yourdon Press Computing Series, 1991.
27. D. Breysse, A. Attar, B. Soulier, B. Mesureur, « Modeling of the tensile response of fiber reinforced concrete », Materials and Structures, vol. 30, n 199, pp. 259-268, June 1997.

28. D. Breysse, A. Denis, A. Attar, JJ. Chauvin, « Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons de sable chargés », Revue Française de Génie Civil, vol 1, pp 87-114, 1997.
29. A. Attar, D. Breysse et B. Mesureur, « Le béton de fibres métalliques : caractérisation et modélisation du comportement en traction uniaxiale », Cahiers du CSTB, pp. 1-42, Mars 1998.
30. A. Attar, R. Connolly, « Evaluation thermo-mécanique d'un moule en béton très haute performance pour le procédé d'injection », Algérien Journal of Technology, Décembre 2000.
31. D. Breysse, A. Attar, A. Denis, JJ. Chauvin, «Effect of coarse aggregate on the workability of sandcrete » Cement and concrete Research, 07/2002.
32. Goupy. J, «La méthode des Plans d'expériences », Edition Dunod, Paris, 1988.
33. Soulier B. , «Sur la modélisation expérimentale en mécanique» : précision, optimisation et applications industrielles. Thèse de doctorat de l'ENS Cachan, Paris, 1994.
34. P. Schimmerling, J.C.Sission et A. Zaïdi, «Pratique des plans d'expériences », Tec Doc, Paris, 1998
35. Box G.E.P. , Hunter W.G. & Hunter J.S ; «statistics for experimentation : an introduction to design, data analysis and model building », Wiley Interscience, New-York,1978.
36. Taguchi G ; «System of experimental design » Uni pub / Krans International Publication, 1987
37. Fisher R. A, «Statistical methods for research workers » Oliver and Boyd, 1925.
38. Statistique : recueil des normes françaises. 1988.
39. J. Poirier, «Analyse de la variance et de la régression plans d'expériences », Technique de l'ingénieur, Traité Mesure Contrôle, R 260, 1993.
40. Schimmerling M., «La méthode des plans d'expérience », Direction de la recherche, Renault, 1989.
41. Aamodt. A, Plaza. E, « Case- Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations and system Approaches », Artificial Intelligence Communactions, Vol.7, No. 1, 1994.
42. Robot Millennium, Manuel du Robot Millennium, version 18.1.