

CHAPITRE II : Interaction sol-structure

Introduction :

Le mouvement du sol qui n'est pas influencé par la présence de la structure est dit mouvement du champ libre. Si la structure est fondée sur une roche solide et elle est soumise à un signal sismique, la grande rigidité de la roche impose que le mouvement de cette dernière soit proche de celui du champ libre, c.à.d. La structure fondée sur une roche est considérée comme étant à base fixe. Par contre, la même structure se comporte différemment si elle repose sur un sol meuble. Ceci peut être expliqué par :

Premièrement : L'incapacité de la fondation de suivre les déformations du champ libre, ce qui engendre un décalage du mouvement par rapport à celui du champ libre.

Deuxièmement : La réponse dynamique de la structure elle-même induit une déformation du sol support.

Ce processus, dans lequel la réponse du sol est influencée par le mouvement de la structure et inversement, ou la réponse de cette dernière a une influence sur le mouvement du sol, est appelé le phénomène d'interaction sol-structure (ISS).

L'interaction sol-structure peut dans certain cas avoir un effet négligeable sur la réponse dynamique de plusieurs structures et de systèmes de fondation. Dans d'autres cas, son effet peut être significatif. La question que pose : négliger son effet est-il conservatif ou pas ? Ceci dépend du détail du problème.

Dans ce chapitre on présentera quelques publications et études sur l'interaction sol-structure puis une illustration de l'interaction sol-structure et finalement une présentation des différentes méthodes d'analyse liées à l'interaction sol-structure.

II-1- Etudes intérieures sur l'interaction sol-structure :

L'interaction sol-structure est souvent négligée par les ingénieurs lors de l'analyse et du design d'un barrage. Pourtant, ce phénomène a beaucoup d'influence lors de l'étude du comportement du barrage. Le premier aspect est lié à la sécurité, puisque la répartition des efforts dans le corps du barrage peut être différente si on tient compte de l'interaction sol-structure. De plus, l'utilisation normale peut aussi être affectée par des problèmes de fissurations causées par les tassements différentiels. Finalement, les coûts des constructions choisies sont influencés par la répartition des efforts découlant de l'interaction sol-structure. Pour cette raison, plusieurs recherches sont faites dans ce domaine parmi lesquelles :

Clough et penzien, 2000 : Ont discuté le problème de l'interaction sol-structure traitant le cas des structure multi supports, comme les ponts.

M.kutanis et M.elmas, 2000 : Ils ont abordé une modélisation en éléments finis (2D) de l'interaction dynamique sol-structure par la méthode de sous structure en utilisant un programme établi par les auteurs. [14]

Trois types d'analyses ont été faites :

- Une analyse linéaire de l'interaction dynamique sol-structure.
- Une analyse non-linéaire de l'interaction dynamique sol-structure.
- Pour la même structure, l'analyse a été faite sans prendre en considération l'effet d'interaction dynamique sol-structure.

Trois enregistrements sismique ayant trois différentes valeur de PGA (peak gronde accélération 0,15 g 0,3 g 0,45 g) ont été choisis pour solliciter le modèle. Ainsi que trois types de sol caractérisés par des vitesses de propagation des ondes de cisaillement. [14]

K.antar, 2004 : A démontré l'importance des effets de l'interaction sol-structure.

Il commence par une comparaison entre une structure à base fixe et une autre à base flexible. Par la suite, une étude paramétrique a abouti à des validations et critique de quelques résultats des chercheurs concernant l'interaction inertielle sol-structure. Enfin, des expressions du code américain (BSSC97) ont été validées par l'introduction des spectres du code algérien (RPA99.version 2003). Il a été proposé de combiner le rapport d'ancrage e/r (e : profondeur d'ancrage, r : rayons équivalents d'une fondation rectangulaire) couramment utilisé avec un autre rapport e/h qui tient compte de la hauteur (h) de la structure. Il a été démontré que l'interaction sol-structure n'affecte que le mode fondamental. L'application du code algérien dans le dimensionnement d'une structure en béton armé a montré que l'interaction sol-structure permet de diminuer le ferrailage et de majorer le joint sismique de 45%.

H.shakibet et A.fuladgar, 2004 : Ont formulé une approche dans le domaine temporel pour l'analyse linéaire en 3D de l'interaction sol-structure d'un bâtiment de forme anti symétrique. Le but était d'évaluer la réponse sismique torsionnelle de la structure. La modélisation de la structure est faite pour un bâtiment à un seul étage en (3D) reposant sur un sol. Le sol est modélisé par des éléments solides, élastiques et linéaires. Le contact entre la fondation et le sol est modélisé par les éléments d'interfaces plans linéaires d'épaisseur nulle.

Deux composantes latérales du séisme d'El Centro 1940 ont été appliquées Simultanément sur le système suivant les directions X et Y.

M.oudjene et al, 2005 : Ont démontré que dans la gamme des hautes fréquences la modification de l'action sismique n'est pas prise en compte par la forme des différents spectres

de réponse ainsi propose. Ensuite, ils ont discuté d'état actuel de ses spectres de calcul et ont suggère que l'allongement de la période fondamentale n'implique pas systématiquement la diminution de l'accélération spectrale.

K.louay et al, 2006 : Ont fait une étude paramétrique de l'influence de l'interaction sol-structure sur la fréquence fondamentale des structures sous chargement sismique. L'analyse est effectuée avec une modélisation numérique par élément finis. Le comportement du sol et de la structure est supposé de type élastique. L'analyse statique des résultants obtenue pour un portique représentant un système à un seul degré de liberté a permis la détermination d'un paramètre adimensionnel, intitulé rigidité relative du système sol-structure noté K_{ss} . Un abaque a été construit, en variant les paramètres N_b , N_θ , N_e (nombre d'ouverture le sens horizontal et transversal et nombre d'étage respectivement). [15]

S.grange et ai, 2008 : Ont construit un élément d'interface (3D) modélisant une fondation superficielle de forme circulaire, rectangulaire ou filante reposant sur un massif de sol semi infini et permettant de pondre en compte l'interaction sol-structure en considérant la plasticité du sol et le décollement de la fondation. Cette modélisation est basé sur la méthode des macros élément, cet élément permet de travailler en variables globales (forces et déplacement) et permet ainsi de simplifier le modèle et d'obtenir des tempes de calcul très réduit. Il est implémenté dans FedeaSlab, un code d'élément finis développé sous Matlab.

Des comparaisons avec des résultats expérimentaux d'une fondation soumise à des chargements cycliques, ainsi que dynamiques ont montré le bon fonctionnement de macros éléments (3D) d'interaction sol-structure.

Tahar berrabah.a, 2007 : A étudié l'effet du sol environnant tel que décrit par l'effet d'interaction sol-structure sur le comportement dynamique du barrage de Brezina (barrage poids voûte en béton, à El Beyadh à ouest de l'algérien).

II-2- Définition du phénomène d'interaction sol-structure :

Si le mouvement d'un point D (figure II.1) situé à l'interface du système sol-structure diffère du mouvement qui aurait lieu en champ libre (la structure inexistante) alors il ya à interaction sol-structure. Cette définition est très générale, une définition plus précise peut être donnée tel que : l'interface se déplace ou se déforme différemment par rapport à la surface correspondante dans le champ libre, il ya a interaction.

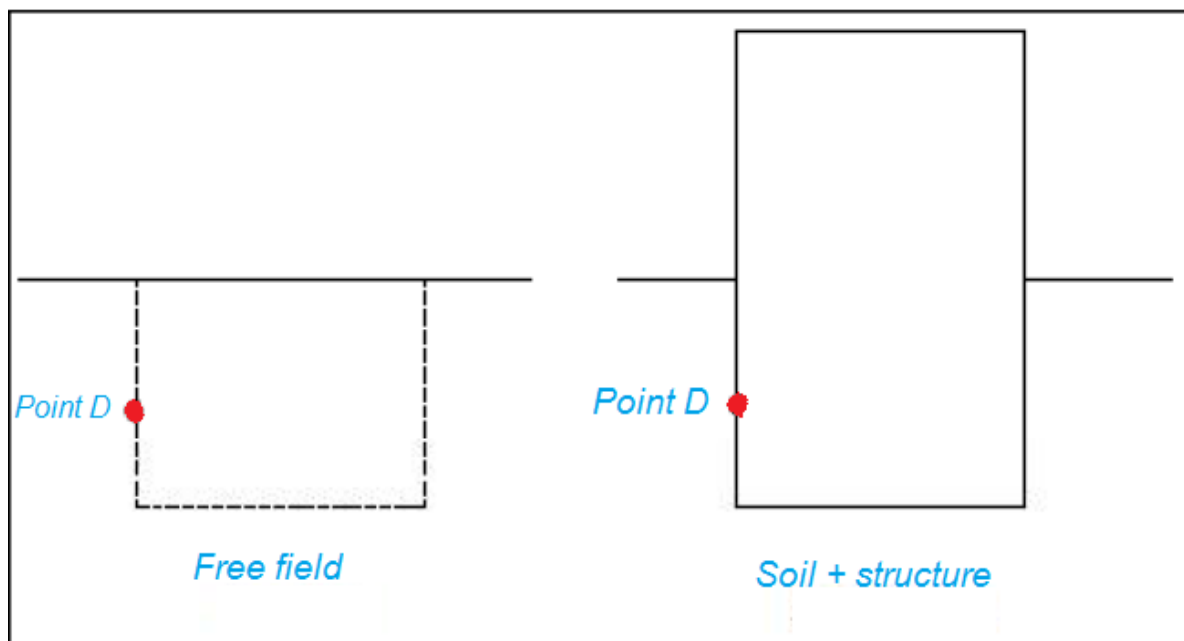


Figure II-1 définition du phénomène d'interaction sol-structure (Emilio rosenbluenth 1980)

Considérons le cas d'une structure caractérisée par sa masse (m) et sa rigidité (k). Si le sol supportant la fondation rigide, alors la pulsation naturelle du système dépend seulement de la masse et la rigidité de la structure tel que :

$$\omega_0 = \sqrt{K/m} \quad (\text{II-1})$$

Par contre le sol constituant la fondation est flexible, elle peut se déplacer en translation ainsi qu'en rotation. La rigidité et l'amortissement du système sol-fondation peuvent être représentés par des ressorts de translation, de rotation et par amortisseurs.[18]

***Aspect fondamental de l'interaction :**

La figure II.2 illustre l'aspect fondamental de l'interaction sol-structure, cet aspect est présenté ici dans le cas d'une fondation sur pieux, partiellement enterrée dans le sol, mais les conclusion restent applicables à tout type de fondation.

Si l'on s'intéresse au mouvement de la fondation, les déformations du sol sont transmis à celle-ci et engendrent un mouvement de la superstructure, même en l'absence de Superstructure le mouvement de la fondation est différent du mouvement du champ libre du fait des différences de rigidité entre la fondation et le sol encaissant : le champ d'ondes incident est réfléchi et diffracté par la fondation et donc modifie le mouvement total du sol au voisinage de celle-ci. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction cinématique. Par ailleurs, le

mouvement induit sur la fondation développe des oscillations de la superstructure et donc donne naissance à des forces d'inertie qui sont retransmises à la fondation sous forme de forces et de moments. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction inertielle.

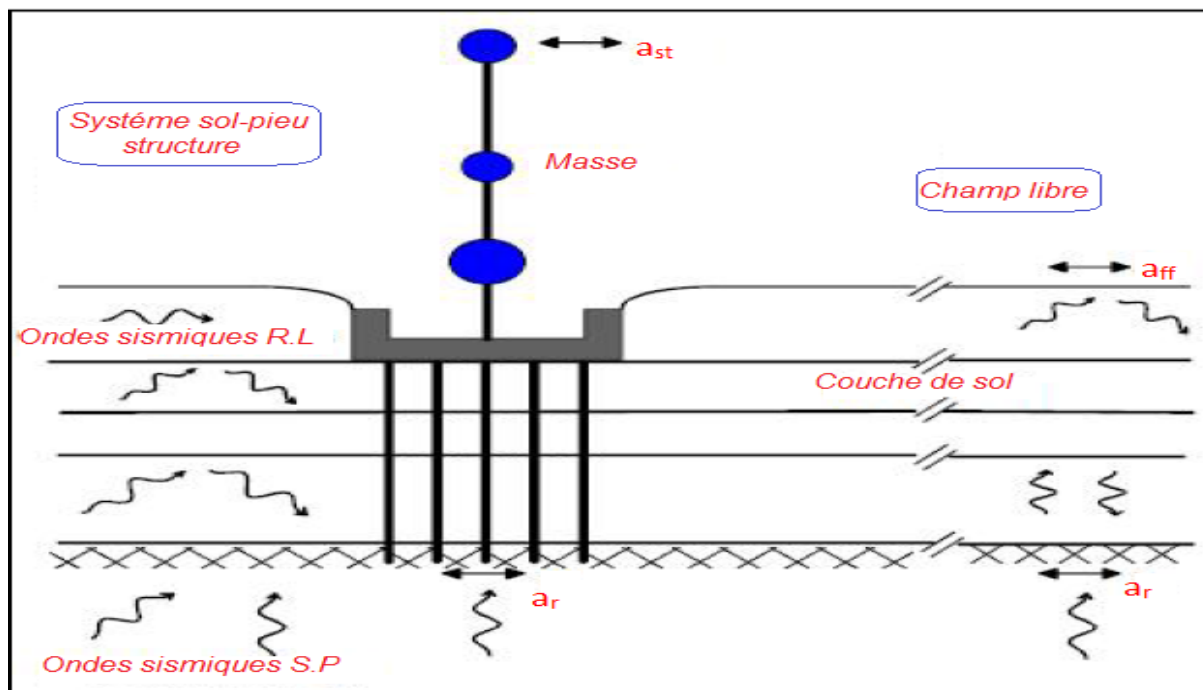


Figure II. 2 effets de l'interaction sol-structure. [12]

De toute évidence, le dimensionnement de la fondation doit tenir compte de ces deux composantes de l'interaction. Généralement à tort le terme interaction sol-structure ne désigne dans l'esprit des ingénieurs que la part inertielle, il convient de garder à l'esprit que l'interaction cinématique peut dans certaines configurations être significative, même si parfois elle peut être négligée.

II-3-Interaction cinématique et interaction inertielle :

Si on s'intéresse au mouvement de la fondation, du sol transmises à celle-ci et engendrent un mouvement de la superstructure, même en l'absence de superstructure le mouvement de la fondation est différent du mouvement du champ libre du fait des différent de rigidité entre la fondation et le sol encaissant, le champ d'ondes incident est réfléchi et diffracté par la fondation et donc modifie le mouvement total du sol au voisinage de celle-ci. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction cinématique.

Par ailleurs, le mouvement induit sur la fondation développe des oscillations de la superstructure et donc donne naissance à des forces d'inertie qui sont retransmises à la fondation sous forme de forces et de moments. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction inertielle.

De toute évidence, le dimensionnement de la fondation doit tenir compte de ces deux composantes de l'interaction.

II-3-Fonctions d'impédance :

Pour une meilleure approximation de la réponse de la structure, on introduit l'effet du sol sur cette dernière, des fonctions reliant les forces et les déplacements à l'interface sol-structure ont été développés, en particulier pour les problèmes de fondation de machines. Ces fonction sont appelées fonction d'impédance de la fondation. Les fonctions d'impédance sont définies généralement sous une forme complexe comportant une partie réelle caractérisant la rigidité et une partie imaginaire caractérisant l'amortissement du sol.

Ce genre de fonction d'impédance peut être utilisé dans une analyse dans le domaine fréquentiel. Cependant l'analyse d'un système compliqué, nécessitant la mise en œuvre d'un grand nombre de degré de liberté, ne peut être simplifiée que si les fonctions d'impédance sont considérées indépendantes de la fréquence d'excitation. En outre la résolution dans le domaine fréquentiel ne peut plus être envisagée si l'analyse est étendue au domaine non linéaire.

II-4-Formulation du phénomène d'interaction sol-structure :

Cette méthode pour l'analyse de l'interaction sol-structure peuvent être divisée en deux catégories principales : la méthode directe (ou méthode globale) et la méthode indirecte.

II-4-1-Méthode indirecte :

Cette méthode s'appuie sur le principe de superstructure. L'idée est de résoudre le problème d'interaction sol-structure en plusieurs étapes successives, ou chacune des étapes étant réputée plus facile à résoudre que le problème global. Pour des raisons évidentes, les infrastructures envisagées sont constitués d'une part par le sol et la structure de l'autre part, comme indiqué dans la (figureII.3). Les équations sont écrites pour chaque sous-système, alors les conditions de compatibilité à l'interface, la continuité des déplacements et des vecteurs de contraintes sont remplies.

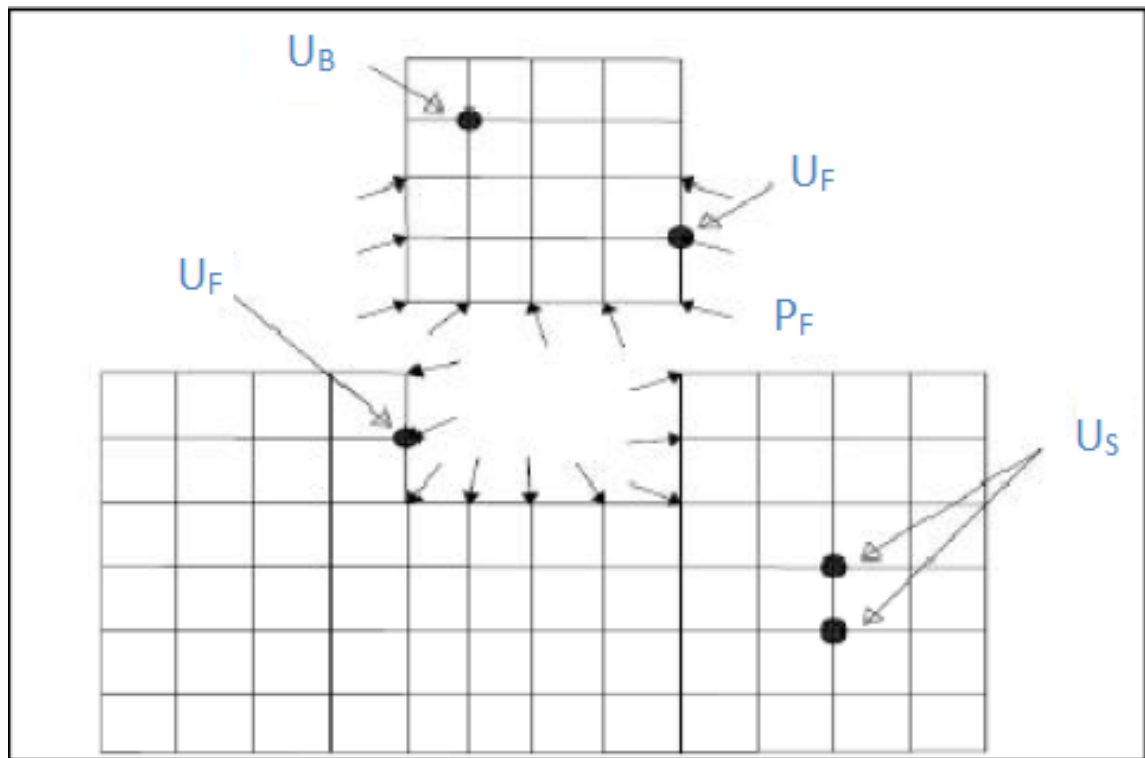


Figure II- 3: Schématisation des sous structure.

Le mouvement du sol qui ne sont pas influencés par la présence de structure, sont appelées mouvement de terrain (champ libre). Lorsque les structures sont présence, elles interagissent avec le sol grâce à un processus qui est l'interaction sol-structure. L'interaction sol-structure a peu d'effet sur la réponse de certains systèmes mais un effet important sur la réaction des autres.

L'interaction sol-structure a un effet important pour des structures lourdes appuyées sur des sols relativement meubles. Pour les structures légères fondées sur un sol rocheux, l'effet d'interaction sol-structure est généralement faible (Steven L. Kramer 1996).

Pour des raisons qui apparaîtront naturelles dans la suite, le problème est traité ci-dessous dans le domaine fréquentiel. Par ailleurs pour ne pas alourdir la présentation, on omettra les termes d'amortissement dans les équations d'équilibre. Il s'ensuit que les grandeurs, par exemple le déplacement U , s'expriment sous la forme de leur transformée de Fourier.

Ainsi, dans l'hypothèse d'une fondation rigide, il est pertinent de scinder le problème global en trois sous- problème :

- Détermination du mouvement d'une fondation rigide sans masse soumise à la sollicitation sismique.
- Détermination de la matrice d'impédance de la fondation.

- Calcul de la réponse dynamique de la structure reliée à la matrice d'impédance et sujette à son support au mouvement d'interaction cinématique.

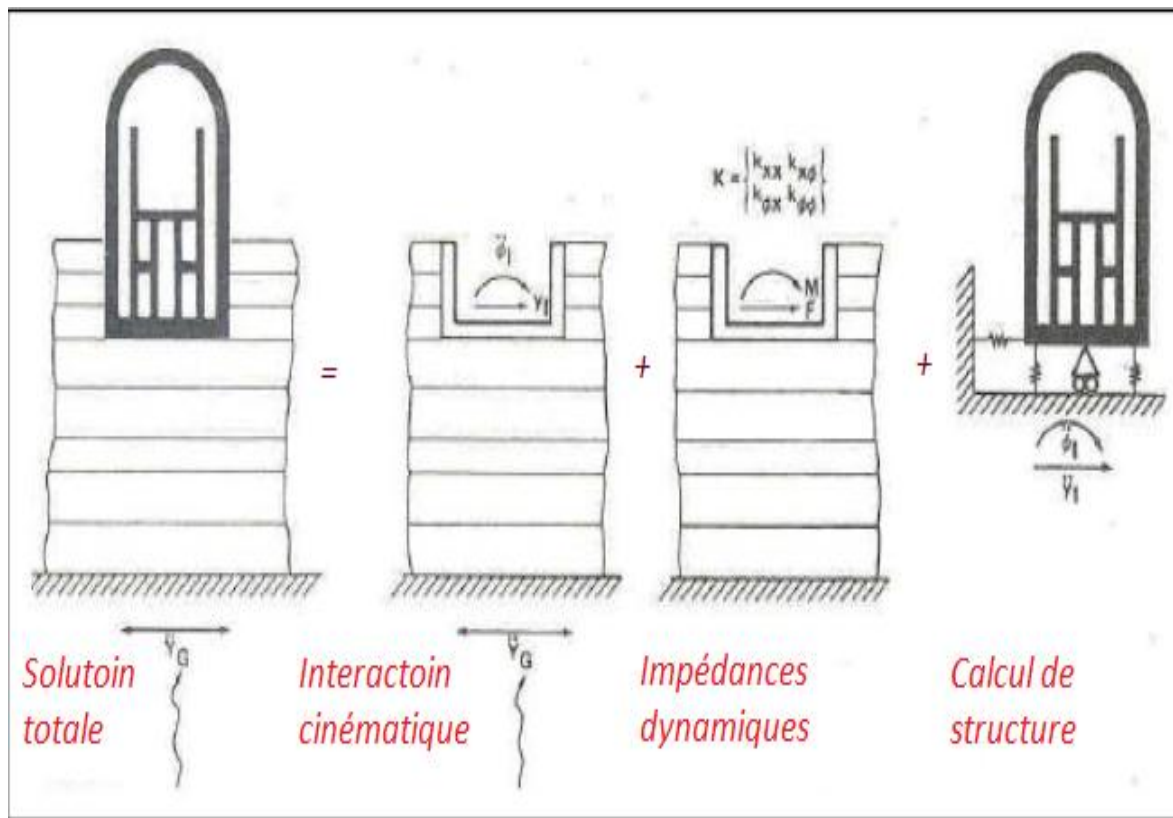


Figure II- 4 théorème de superposition (WOLF).

Dans la mesure où la fondation est parfaitement rigide, cette démarche set rigoureusement identique à celle conduisant à la résolution du système globale en étape. Cette décomposition est connue sous la nom de théorème de superposition de Kausel et est illustrée sur la (figure II.4). Son intérêt apparait clairement s'il est possible de simplifier une des trois étapes du calcul.

L'interaction sol-structure est causée par deux phénomènes : l'incapacité de la fondation pour correspondre à la déformation en champ libre (interaction cinématique) et l'effet de la réponse dynamique du système de structure de base sur le mouvement du sol (Interaction inertielle) (Steven L. Kremer, 1996).

II-4-2-Méthode directe (méthode globale) :

C'est les méthodes les plus directe mais souvent plus complexe, en particulier à cause de leur temps de calcul. On méthode le sol et la structure par des éléments finis, on utilise

directement l'accélérogramme à la base de la structure, ainsi que la réponse complète du dépôt de sol et de la structure. Le problème à résoudre sera défini par l'équation :

$$[M]\{u\} + [C]\{u\} + [K]\{u\} = \{Q_f\}$$

(La mise en œuvre pratique de telles solution est illustrée sur la figure II.5).

En théorie les méthodes globales peuvent être étendues aux cas tridimensionnels et sont susceptibles d'appréhender les comportements non linéaires dus à la loi de comportement d'un des matériaux (sol le plus souvent) ou aux interfaces sol-structure. Si les méthodes globales sont généralement coûteuses du point de vue ordinateur, elles requièrent souvent moins de temps humain que d'autres méthodes approchées exigeant une grande réflexion. Ce temps de réflexion représente également un coût non négligeable [17].

Les méthodes globales ne font intervenir aucune notion de superposition et sont donc théoriquement adaptées aux problèmes non linéaires.

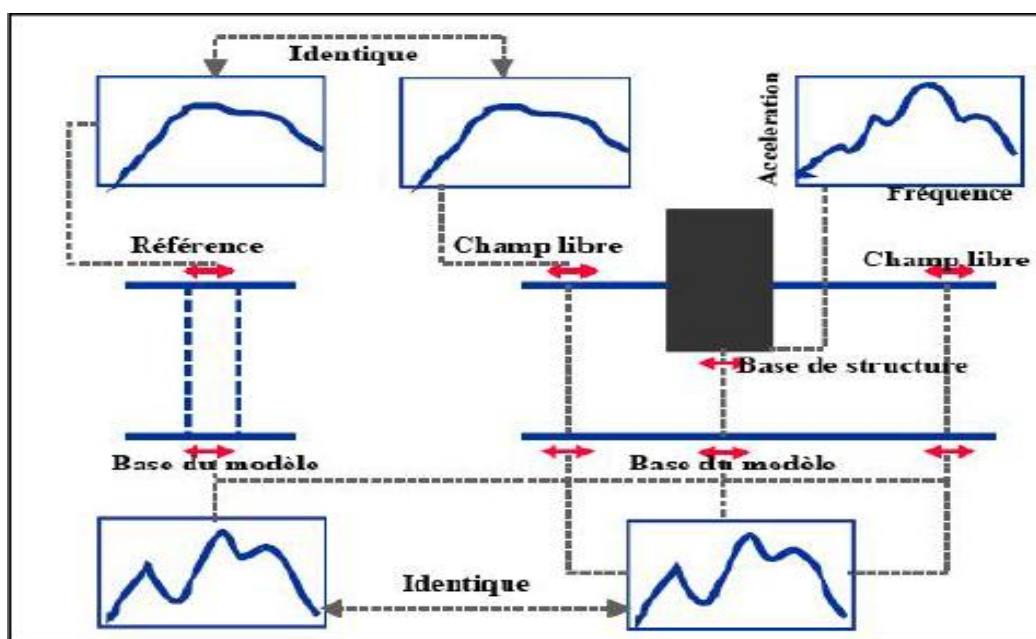


Figure II-5 représentation schématique d'un calcul interaction sol-structure méthode globale.

Remarque :

Un des avantages principaux des méthodes globales est leur capacité à prendre en compte les hétérogénéités résultant soit des variations de faciès, soit des variations des caractéristiques de sol provenant de non linéarités. L'expérience montre qu'elles sont généralement mieux adaptées et plus faciles de mise en œuvre pour l'étude d'ouvrage enterrés.

a-Première étape : Le mouvement sismique de dimensionnement est connu (spécifié) à la surface du sol en champ libre.

b- Deuxième étape : Le mouvement est calculé à la base inférieure du modèle, choisie à une profondeur suffisante pour que la présence d'une structure en surface n'affecte pas ce mouvement, cette étape est connue sous le nom de déconvolution du mouvement sismique.

c- Troisième étape : Le mouvement déconvolué est imposé uniformément à la base du système sol-structure et la réponse est calculée par résolution de l'équation II-1.

La difficulté de la résolution par élément finis des problèmes dynamique d'interaction sol-structure réside dans le traitement des conditions aux limites. (Une onde heurtant une surface libre était totalement réfléchi). Dans le cas présent, les limites du modèle sont introduites de manière artificielle dans celui-ci et la réflexion des ondes à ces interfaces contribue à maintenir l'énergie qu'elles transportent à l'intérieur du modèle, alors que dans la réalité elles la transportent à l'infini (au moins partiellement si d'autre réflexion interviennent).

Sous le vocable amortissement géométrique .Il était possible d'annihiler ce phénomène en introduisant des frontières absorbantes dont le rôle est de rétablir les condition de contraintes et de déplacements à la frontière, dans le cas des poutres ces frontières sont représentées par des amortisseurs dont les caractéristique sont fondation de celles du milieu extérieur au modèle.

Pour le milieu tridimensionnel des frontières analogues ont été développées, ces éléments ne constituant une solution exacte au problème que dans le domaine fréquentiel, dans le domaine temporel elles ne représentent qu'une solution approchée.

II-5- Les composants d'interaction sol-structure :

Avant d'examiner les différentes méthodes de l'interaction sol-structure, il est utile de formuler de façon générale. Cette formulation est orientée vers un traitement par éléments finis du phénomène d'interaction. En effet la complexité du problème est telle que le recours aux méthodes numérique est pratiquement inévitable. Les équations du mouvement sont obtenues par référence à la figure II.6 qui schématise un ensemble sol-structure.

L'interaction cinématique peut induit des modes de déformation, comme le basculement et la torsion que ne sont pas présents dans un mouvement en champ libre. L'interaction inertielle se produit lorsque les forces transmises au sol par la réponse dynamique de la structure de produit des mouvements de base qui ne se produirait pas dans une structure à base fixe. L'effet de l'interaction inertielle est généralement plus prononcé que l'effet de l'interaction cinématique (Steven L. Kramer, 1996).

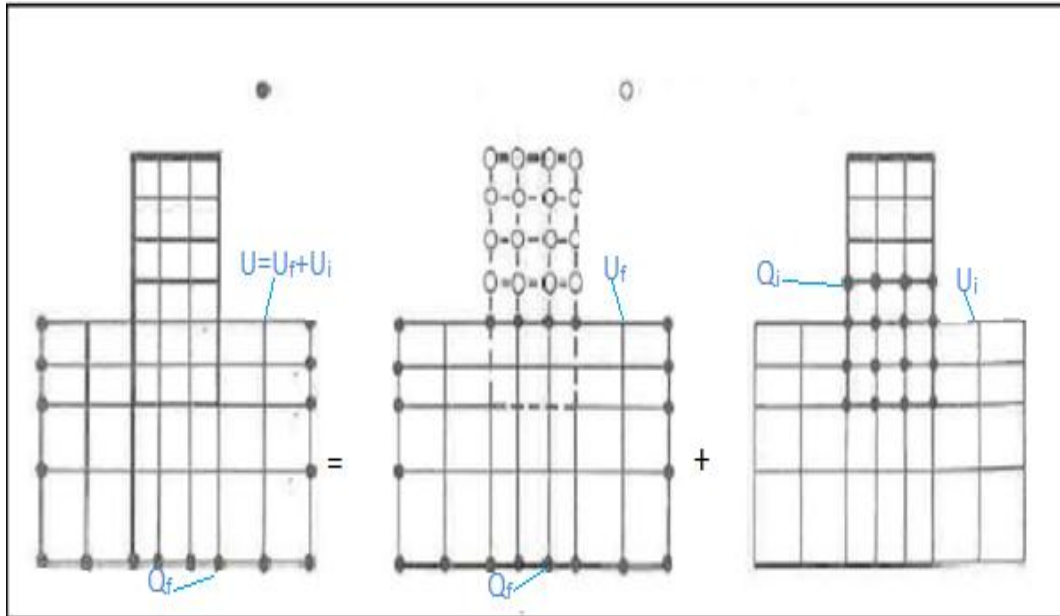


Figure II- 6 décomposition du problème d'interaction sol-structure (KAUSEL).

Désignant par M , C , K les matrices masse, amortissement et raideur du système, l'équation du mouvement s'écrit :

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = Q_f \quad (\text{II-2})$$

Comme la source du mouvement (foyer du séisme) n'est généralement pas incluse dans le modèle, le vecteur de charge a des valeurs nulles que sur la frontière extérieure du modèle.

$$Q_i = [M - M_f] \ddot{U}_f + [C - C_f] \dot{U}_f + [K - K_f] U_f \quad (\text{II-3})$$

II-5-1-Force d'interaction inertielle :

L'équation (II-3) met clairement en évidence le fait qu'il ya interaction dès qu'il ya différence de masse ou de raideur entre le sol et la structure. Supprimons pour simplifier le terme d'amortissement dans cette équation et restreignons le problème à celui d'une structure posée à la surface du sol et soumise à la propagation verticale d'ondes de volume (cisaillement ou compression). Dans ces conditions, en champ libre tous les points de la surface du sol sont animés d'un même mouvement. Si la fondation de l'ouvrage est

Infiniment rigide, le dernier terme de l'équation (II-3) s'annule, le vecteur de charge Q_i se réduit à :

$$Q_i = [M - M_f] \ddot{U}_f \quad (\text{II-4})$$

Les forces $\mathbf{Q}_i$ appliquées à la base de la structure engendrent un mouvement du support, équivalent à un champ de force d'inertie dans la structure. Par la suite l'interaction ne résulte que des forces d'inertie développées dans cette structure. On lui donne le nom d'interaction inertielle.

II-5-2-Force d'interaction cinématique :

A l'opposé considérons une structure enterrée dont la masse est nulle hors du sol et égale (en valeur et répartition) à celle du sol pour la partie en terre. Les forces $\mathbf{Q}_i$ ont alors pour expression :

$$Q_i = [K - K_f] U_f \quad (\text{II-5})$$

Elles ne résultent que de la différence de raideur pour la partie en terre, entre le sol et la structure. Même sans différence de masse, il y a interaction on lui donne le nom d'interaction cinématique. Elle résulte de la raideur de la fondation qui l'empêche de suivre les mouvements imposés par le sol. On a vu précédemment qu'elle était rigoureusement nulle pour certains cas, elle peut être faible dans d'autres cas (fondation sur pieux souples) ou très importante (structure raide fortement enterrée dans sol).

Dans le cas le plus général l'interaction résulte d'une interaction inertielle et d'une interaction cinématique.

II-6-Conclusion :

Dans ce chapitre on retient que l'interaction sol-structure ne peut être négligée, car ces deux composantes doivent être prises en compte dans le calcul de structure (interaction cinématique, interaction inertielle), cependant l'effet de contact reste un facteur non négligeable, ce phénomène sera expliqué dans le chapitre suivant.