CAO ET CALCUL PAR ELEMENTS FINIS APPLIQUES AU BATIMENT

Amar Bouberguig
Docteur es Sciences - Ingénieur civil EPFL*
Philippe Moreno
Ingénieur civil INSA
Patrick Cherzal
Ingénieur civil, Ecole d'Ingénieurs de Lausanne

1 INTRODUCTION

Une analyse rapide de la situation actuelle montre qu'un tournant important s'est effectué dans l'informatique appliquée au bâtiment. Jusqu'à un passé récent, il était admis que l'application de la CAO à la construction restait réservée aux grands bureaux d'ingénieurs, vu l'importance des investissements nécessaires, au niveau tant matériel que logiciel. Dès qu'on voulait aller au-delà du calcul statique (en particulier celui des dalles et des poutres), que ce soit aborder le dessin en béton armé, en construction métallique ou celui des plans d'architecte, on se trouvait dans l'obligation de passer à une gamme supérieure de matériel : écran couleurs 21", plotter de format AO, tablette de digitalisation et ordinateur central à grande capacité de calcul et de stockage.

La nécessité d'une telle puissance s'expliquait par le mode de travail interactif des logiciels de CAO. Autrement dit, si pour le calcul statique on peut se contenter de laisser travailler l'ordinateur assez longtemps pour utiliser les résultats après, on doit procéder d'une manière toute différente avec les programmes interactifs graphiques. En effet, la pratique montre qu'un temps de réponse trop long durant l'élaboration des plans (modification, zoom, redessin, etc...) rend pratiquement inutilisable un logiciel de CAO.

Aussi, le premier élément important du tournant auquel on assiste réside dans l'augmentation considérable de la puissance des ordinateurs et la baisse des prix du matériel informatique, mettant ainsi la CAO à la portée de tous les bureaux. Le deuxième fait important consiste en un développement considérable des logiciels de CAO, ce qui rend courant l'élaboration des dessins directement sur ordinateur. Cela concerne essentiellement les plans d'architectes, les plans de coffrage et les plans d'armatures.

Parallèlement à cette évolution, une autre étape importante a été franchie par un grand nombre de bureaux. Cette étape concerne **l'informatisation des échanges de plans** entre l'architecte, l'ingénieur et le dessinateur. Cela est devenu particulièrement aisé grâce au **standard d'échange DXF**. Il suffit en effet de demander aux programmes de CAO l'enregistrement du plan selon le format DXF, et le plan ainsi stocké devient accessible à tous les autres logiciels de CAO.

Cette situation nouvelle rend possible **le lien entre le dessin et le calcul.** Cela constitue un facteur fondamental pour tirer entièrement profit des potentialités offertes par les programmes et optimiser d'une manière importante le travail dans les bureaux d'ingénieurs. Comme le montrera l'exemple traité dans cet article, il apparaît clairement qu'on peut réaliser une économie de temps appréciable sur l'étude du bâtiment. Pour cela, il faut définir une méthodologie de travail rigoureuse en structurant dès le départ le dessin en "couches" séparées. L'échange d'informations entre l'architecte, le dessinateur et l'ingénieur devient alors particulièrement aisé.

En ce qui concerne la phase calcul et dimensionnement, le logiciel MAPS est basé essentiellement sur la méthode des éléments finis. Mis au point il y a environ quinze ans, il a été confronté, par son utilisation dans la pratique, à l'épreuve des faits. Ce qui a obligé les concepteurs à effectuer un travail incessant de développement, d'adaptation et parfois de changement fondamental, pour aboutir finalement à un produit plus élaboré et mieux adapté au travail de l'ingénieur.

L'utilisation quotidienne de la chaîne MAPS mon-

*EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

tre qu'elle apporte une aide substantielle à l'ingénieur dans les différentes phases de l'élaboration d'un projet :

- reprise du plan d'architecte et de coffrage
- maillage automatique du réseau, calcul statique et analyse graphique des résultats
- dimensionnement et dessin des plans d'armatures et listes de fer .

Cela sera illustré à travers un exemple concret. Dans cet exemple, on est parti du plan d'architecte pour arriver jusqu'au plan d'armature et liste de fer.

1 REPRISE DU PLAN D'ARCHITECTE ET DE COFFRAGE

Cette première phase peut se subdiviser en deux étapes :

a) reprendre le plan d'architecte sous le format DXF (Figure 1).

b) extraire du plan d'architecte le plan de coffrage (Figure 2) en sélectionnant essentiellement les données suivantes : murs porteurs, trous, sommiers, colonnes, contour de béton, cotations, traits d'axe, etc... .

A partir de là, on peut constituer une base de données unique pour disposer des paramètres nécessaires au maillage par éléments finis et pouvoir dessiner automatiquement le fond de plan pendant les phases de dimensionnement et de dessin de plan d'armatures.

Ainsi, on peut voir l'enchaînement logique des différentes opérations et le gain de productivité que cela assure aux bureaux d'ingénieurs surtout au niveau "temps dessinateur".

Remarque importante : on signalera qu'il n'est pas nécessaire de disposer dès le départ du plan d'architecte, ou de coffrage. Il est tout a fait possible de partir uniquement du schéma statique (bord de dalle, axe des murs et des poutres, position des colonnes). L'utilisateur peut faire ce schéma statique avec son logiciel de CAO (AutoCAD, BACAD, CADWORK, CADARM, etc...) ou directement à l'intérieur du logiciel MAPS.

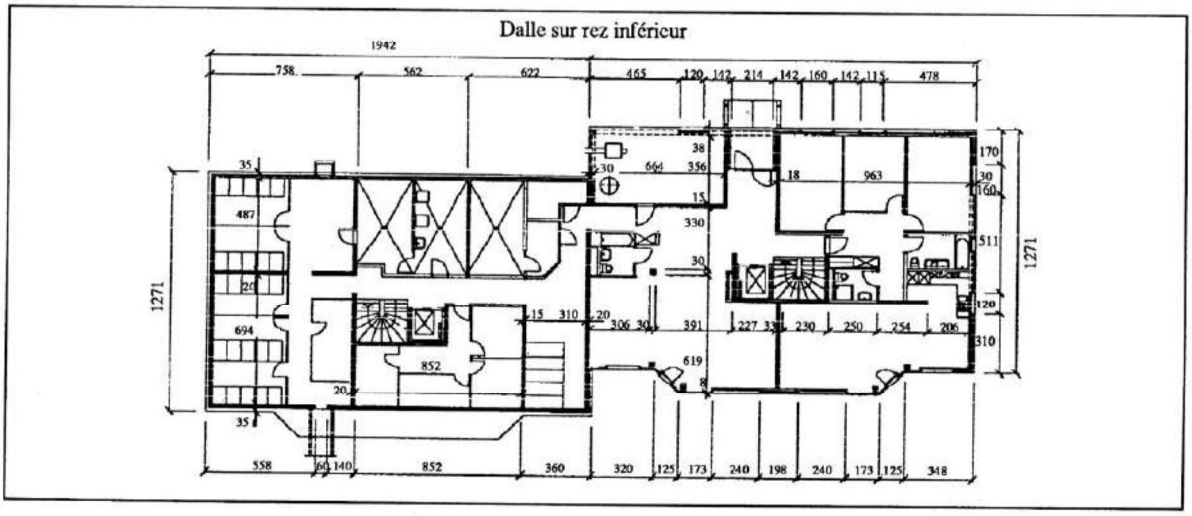


Figure 1 : Reprise du plan d'architecte.

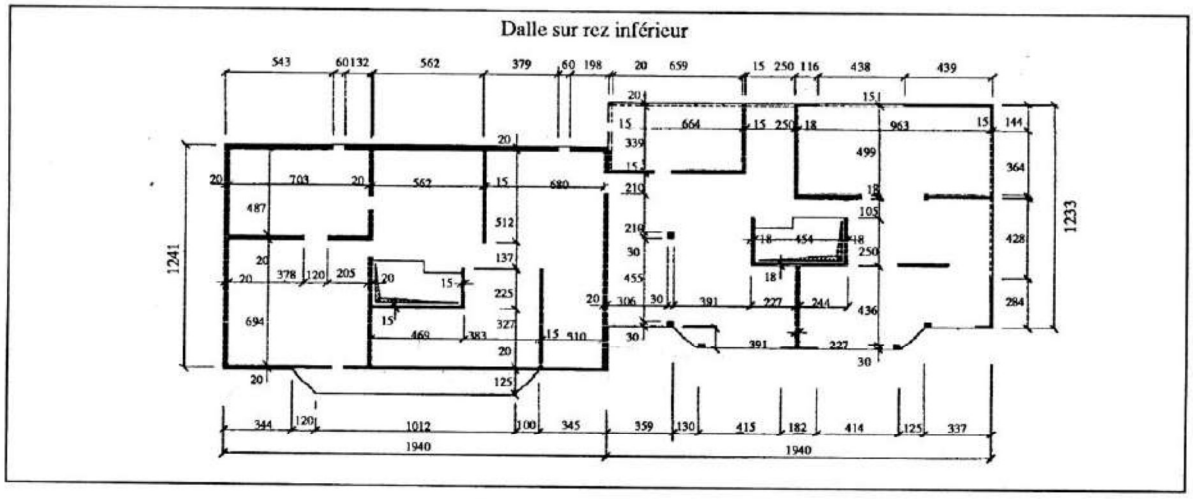


Figure 2 : Plan de coffrage

La partie calcul commence après cette première phase qui est essentiellement graphique.

La première étape de cette partie de calcul consiste à générer le maillage du réseau.

2 GENERATION DU MAILLAGE ET CALCUL STATIQUE

Le travail de l'ingénieur commence ici. Pour cela, le programme lui facilitera considérablement la tâche en commençant par générer d'une manière entièrement automatique le maillage du réseau d'éléments finis (Figure 3).

6. Les appuis sont générés d'une manière automatique en bas des murs des colonnes
7. Visualisation de toutes les données introduites (maillage, épaisseurs, sections, charges réparties ou ponctuelles, appuis, etc.)
8. Visualisation en perspective (avec élimination des lignes cachées) de la dalle avec les murs et les colonnes (Figure 3).

Cet ensemble d'opérations permet de définir entièrement la structure. On peut effectuer le calcul par éléments finis. Cette phase entièrement automatique reste transparente à l'utilisateur.

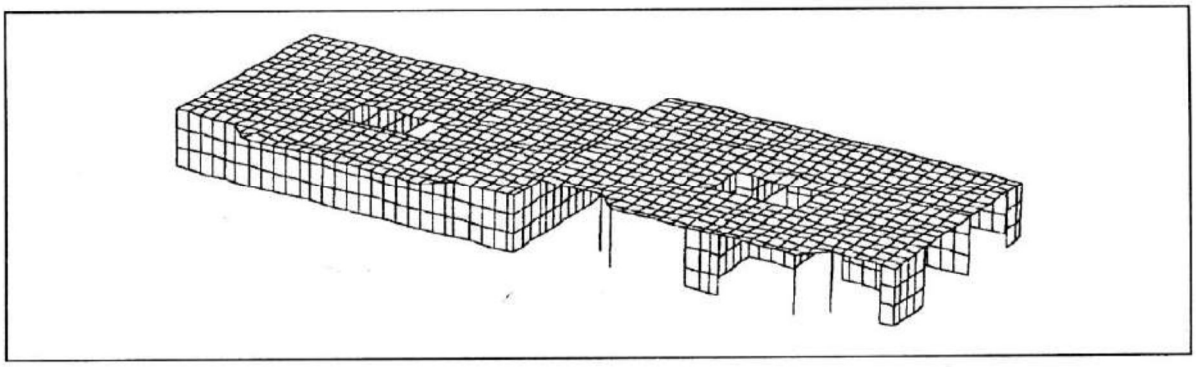


Figure 3 : Maillage automatique du réseau, y compris les murs et les colonnes.

Ce maillage inclut la dalle, les murs, les colonnes et les poutres, sommiers ou solives. Ce maillage ne nécessite aucune retouche de l'utilisateur, puisque la géométrie des éléments finis utilisés par MAPS peut être déformée d'une manière très importante sans que cela n'altère la qualité des résultats.

Après cette phase entièrement automatique, le programme offre à l'ingénieur les possiblités suivantes pour compléter les données de sa structure :

1. Définition graphique des épaisseurs par zones.
2. Définition graphique des sections des sommiers ou des colonnes et visualisation des sections correspondantes.
3. Introduction graphique des charges ponctuelles
4. Introduction graphique du poids propre et des charges réparties par zones (délimitées par une ligne polygonale) indépendamment du réseau.
5. Définition graphique des charges linéaires indépendamment du réseau.

Il est cependant important de présenter les bases théoriques de cette phase de calcul. Cela a été fait dans le cadre de publications scientifique [1]. Aussi, cet article se limitera à l'aspect pratique qui intéresse le plus l'utilisateur.

Les résultats obtenus peuvent être analysés à l'aide d'un postprocesseur, en mode interactif-graphique. Cette analyse peut s'effectuer zone par zone, pour des études de détails, ou globalement. Les résultats peuvent être représentés de différentes façons :

- courbes de niveau des efforts (Figures 4) ;
- Trajectoire des contraintes principales ;
- Diagramme des efforts et des déformations dans la dalle ;
- Efforts et déformations dans les colonnes, les murs porteurs et les sommiers ;
- Vue en perspective.

[1] A. Bouberguig : Modèle d'éléments finis pour le calcul du bâtiment, annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics n°463, mars-avril 1988, série théorie et méthodes de calcul 297.

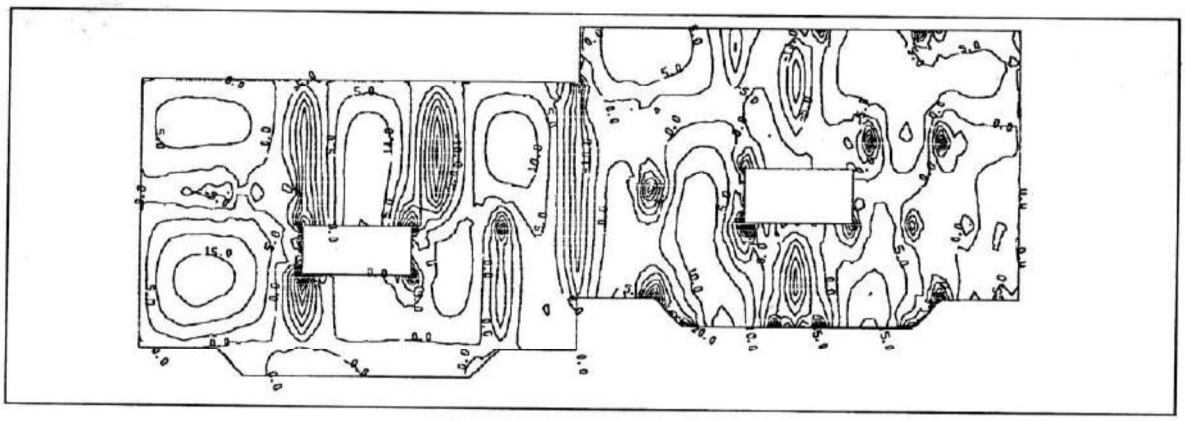


Figure 4 : Moment de flexion Mx.

3 DIMENSIONNEMENT

Dans le cas de la dalle, le module dimensionnement permet la détermination des aciers sous l'effet des efforts obtenus par le calcul statique. Ce module relit les résultats des éléments finis et, pour plusieurs combinaisons de cas de charge, détermine les surfaces "enveloppes" des moments de flexion. A partir de cette étape, l'opérateur poursuit par les opérations suivantes :

3.1 Choix des paramètres de dimensionnement en mode interactif graphique.

3.2 Calcul par le programme des sections d'acier selon les normes SIA 162, BAEL, DIN, etc ...Ce calcul peut être effectué par zone (pour tenir compte des différences d'épaisseur ou de matériau) et selon les directions adaptées à chacune des zones.

La représentation graphique sur le fond de plan des armatures calculées se fait sous forme de trame de différentes couleurs, pour les nappes inférieures et supérieures dans les deux directions. A partir de là ; le programme effectue automatiquement un avant-métré pour permettre à l'ingénieur d'avoir une idée assez précise de la quantité de béton et d'acier.

3.3 Dimensionnement sous contrôle de l'ingénieur.

Dans cette phase, l'ingénieur réalise le dimensionnement effectif en mode interactif graphique. Pour cela, il choisit les endroits de la dalle où il veut faire des coupes, et le programme représente sous forme de diagramme les moments d'armatures. Le long de ces coupes le programme calcule le moment d'armatures total, le moment par mètre linéaire selon un dimensionnement aux états limites (Figures 5 et 6) et propose à l'ingénieur le diamètre et l'espacement des barres d'armatures ultimes de résistance. L'ingénieur confirme ou refuse ce choix, avant de passer à la prochaine nappe. Le calcul des moments d'armatures total se base sur la valeur maximum pour la nappe inférieure et sur la valeur moyenne pour la nappe supérieure (il coupe les pointes pour les moments négatifs sur appui) (Figure 11).

Ainsi, après avoir défini la largeur des nappes, l'ingénieur se base sur les courbes de niveau de moment nul pour spécifier au programme la longueur des barres (Figures 7 et 8) en y ajoutant éventuellement les longueurs d'ancrage. De cette façon, il peut dimensionner l'ensemble de la dalle. Sur les figures 7 et 8 on a représenté le schéma récapitulatif que le programme fournit pour les nappes inférieures et supérieures selon la direction X.

A travers ce résumé, il apparaît clairement que le dimensionnement sur ordinateur fournit à l'ingénieur un ensemble d'informations dans le but de l'aider dans le choix des sections de béton et des diamètres d'armatures. Une fois ce choix fixé, il permet l'élaboration des plans d'exécution et des listes de fers dans des conditions optimales.

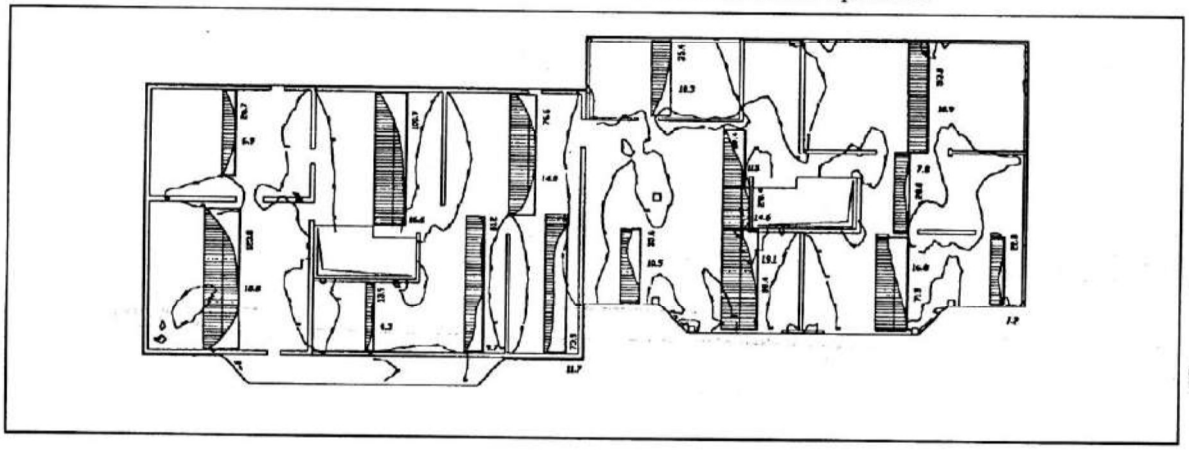


Figure 5 : Intégration des moments d'armature (Mx + Mxy) pour la nappe inférieure.

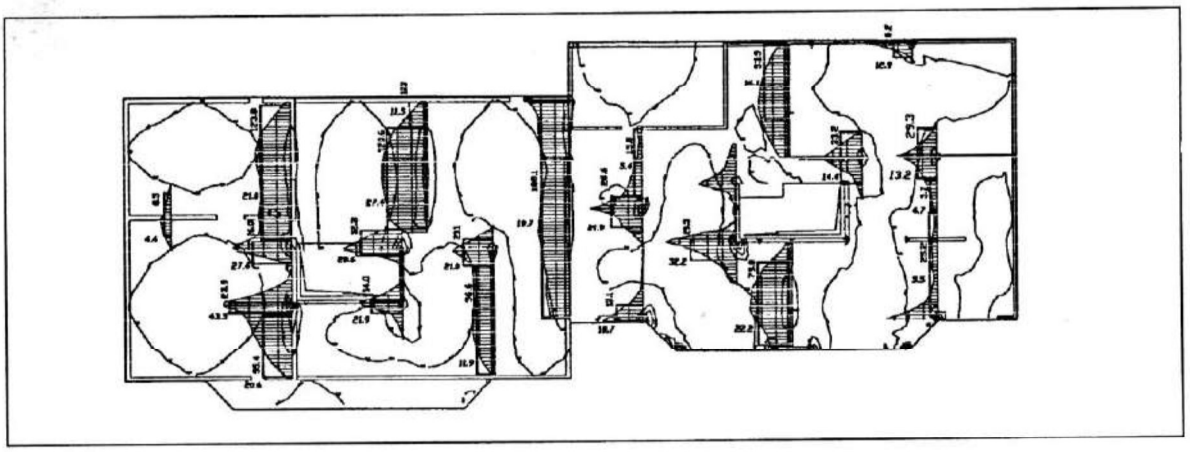


Figure 6 : Intégration des moments d'armature (Mx + Mxy) pour la nappe supérieure.

4 LIEN AVEC LA CAO : DESSIN DU PLAN D'ARMATURES

Après la phase de dimensionnement, le programme connaît le diamètre, l'espacement et la longueur des barres. Il connaît également la position de chaque nappe (Figure 7 et 8). Il peut donc restituer, d'une manière entièrement automatique, ces nappes sous forme de plan d'armatures (Figure 9) et de liste de fer. Ce dessin de base est accessible aux programmes de CAO (AutoCAD, CADWORK, BACAD, CADARM, Medusa, etc...), pour permettre au dessinateur de compléter le plan d'armature : armatures constructives, chaînages, etc....

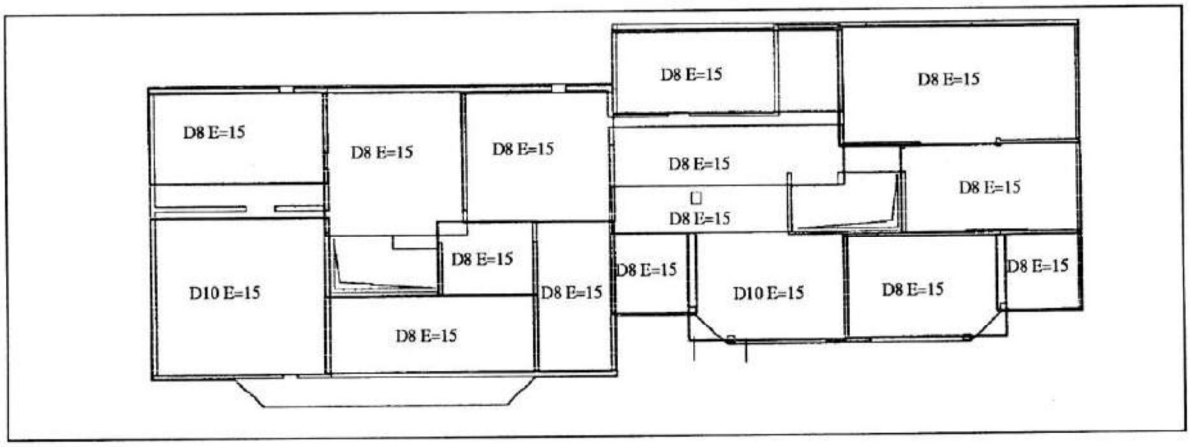


Figure 7 : Nappes inférieures selon la direction X.

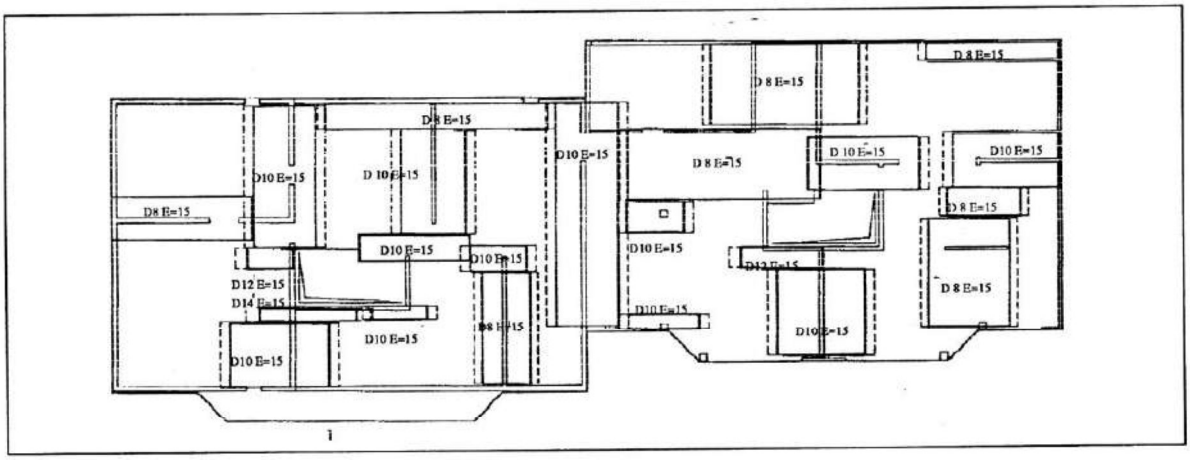


Figure 8 : Nappes supérieures selon la direction X.

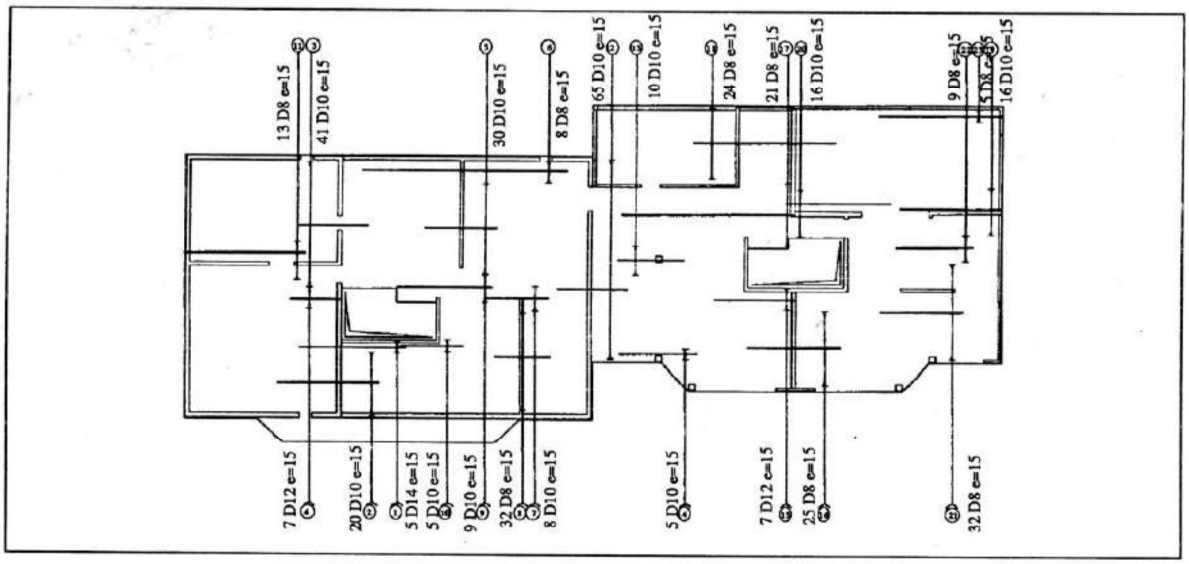


Figure 9 : Plan d'armatures correspondant aux nappes des figures 8 et 9.

5 DESCENTE DES CHARGES

Une possibilité graphique particulièrement intéressante consiste à dessiner automatiquement la descente des charges (Figure 10).

Sur le dessin, on représente pour chaque mur la répartition des efforts, leur intégrale et la valeur moyenne par mètre courant. Pour chaque colonne, on dessine un carré dont l'aire est proportionnelle à l'effort qui passe dans la colonne.

En dernier lieu, on affiche la somme totale des charges. Si la coupe est faite au niveau de la dalle, cette somme n'inclut pas le poids des murs et des colonnes. Par contre, si la coupe est faite en bas des murs et colonnes, elle inclut le poids propre de ces porteurs.

Ainsi, on a pu illustrer l'ensemble des phases, depuis le plan d'architecte jusqu'au plan d'armatures à travers l'étude d'un seul étage. Ce choix s'explique par la pratique qui consiste à calculer le bâtiment étage par étage pour dimensionner chaque dalle.

Cependant, ce travail ne sera complet que si on effectue une analyse de la stabilité générale de l'ouvrage sous l'effet des charges horizontales (vent, séisme, etc...).

Pour cela, le logiciel MAPS permet de fusionner plusieurs étages entre eux, même s'il y a des différences entre les étages. Sur la figure 12 nous avons représenté une vue en perspective du bâtiment sur plusieurs étages, dont la dalle du premier étage correspond à l'exemple traité précédemment. Dans ce bâtiment, on a inclus le radier sur sol élastique et les pieux.

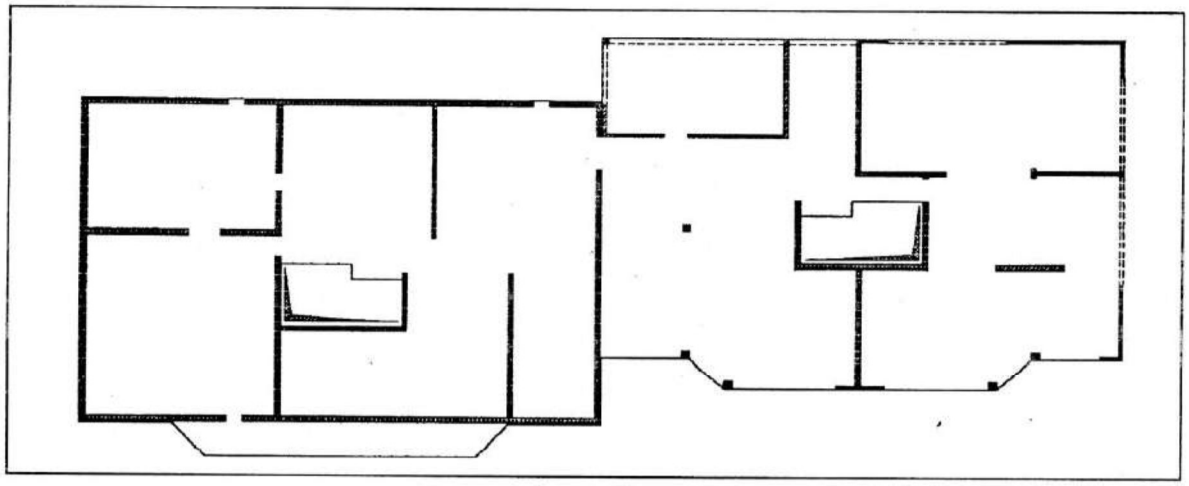


Figure 10 : Représentation des porteurs : murs et colonnes.

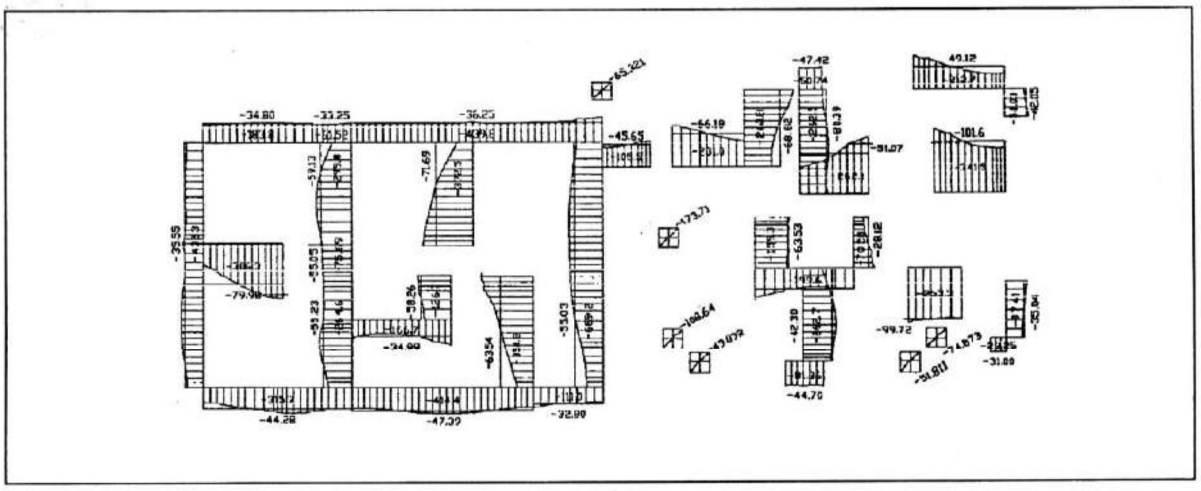


Figure 11 : Dscente des charges correspondant au porteur de la figure 11.

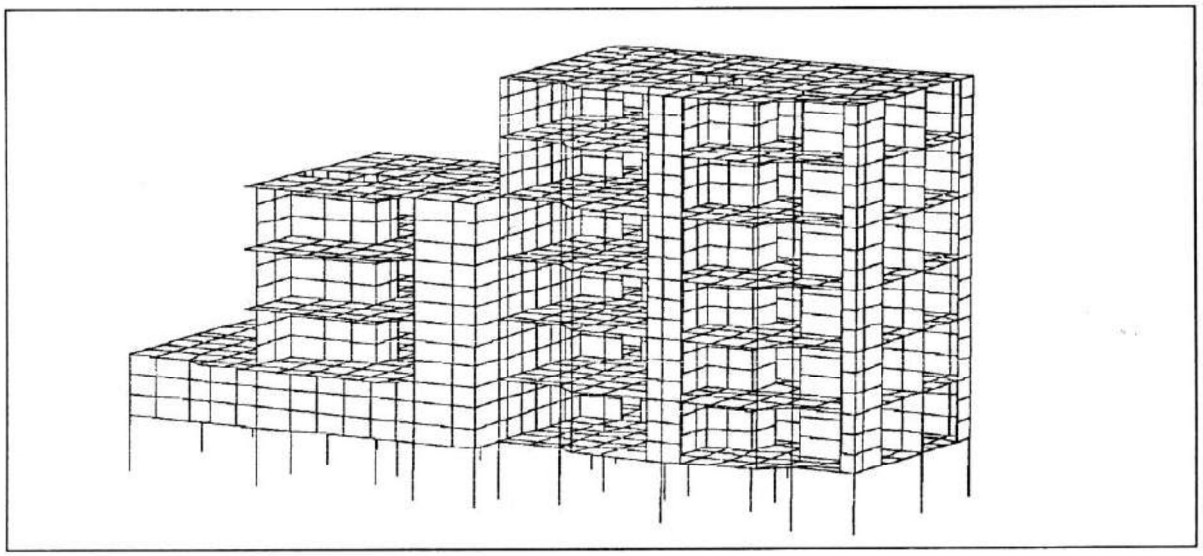


Figure 12 : Vue en perspective du bâtiment sur plusieurs étages.

Réunions Scientifiques

• **1996, 26-28 Novembre, Biskra, Algérie.**
Séminaire National de génie civil,
Contact : Institut de génie civil,
Centre universitaire de Biskra, BP 145
7000 Biskra,
Tél : (04) 71/28/70 & 71/83/68, Fax : (04) 74/07/30,
Télex : 88 094.

• **1996, 2-4 Décembre, Oran, Algérie.**
Séminaire - Etat de l'art et perspectives en prévision sismique,
Contact : Secrétariat du séminaire,
CRAAG/USTO-IGC
BP 63 Bouzareah 16340 ou BP 1505
El M'nouar 31000 Oran,
Tél : (02) 94/11/18, Fax : (02) 94/11/57.

• **1996, 9-13 Décembre, Boumerdès, Algérie.**
5è Séminaire National de Mécanique Fabrication Méc/Construction Méc/ Energétique,
Contact : Institut National de Génie Mécanique
(INGM) 35000 Boumerdès
Tél : (02) 81/93/90 Fax : (02) 81/63/90 Télex : 68 464

• **1997, September 2-6, Istanbul, Turkey.**
International Symposium on Geology and Environment.
Contact : Secretary GEOENV' 97. P.K. Kizilai,
06424 Ankara. Turkey.
Tél. : 90-3124343601 ; Fax : 90-3124342388.