

LA CAO APPLIQUEE AU BATIMENT : le logiciel CESARS-MAPS

Par
Amar BOUBERGUIG et AL
ITC Seritec S.A., le Mont-sur-Lausanne

Résumé

Une analyse rapide de la situation actuelle montre qu'on est en présence d'un tournant important concernant l'informatique appliquée au génie civil. Jusqu'à ce jour, il était couramment 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 pour 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 : écrans couleurs 19", plotter AO, tablette de digitalisation, unité centrale à grande capacité de calcul et de stockage.

Mots clés : CAO - programme interactif - génie civil - architecture - plan de coffrage - plan d'exécution - MEF.

1 INTRODUCTION

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 toute une nuit pour utiliser les résultats le lendemain, 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 la baisse sensible des prix du matériel informatique, baisse entrevue ces dernières années et qui se confirme actuellement, mettant ainsi la CAO à la portée de pratiquement tous les bureaux d'ingénieurs.

Le deuxième fait important consiste en une évolution considérable du logiciel : les programmes, mis au point au début des années 80 [1] et [3], ont été confrontés, par leur utilisation dans la pratique, à l'épreuve des faits.

Les concepteurs sont obligés d'effectuer un travail incessant de développement, d'adaptation et parfois de changement fondamental, pour aboutir finalement à des produits plus élaborés et mieux adaptés au travail de l'ingénieur.

Nous pensons que le logiciel CESARS-MAPS fait partie de ces produits, c'est pourquoi il nous a semblé utile d'en faire une description claire et succincte pour apporter ainsi un élément d'information supplémentaire aux bureaux d'étude désirant s'informatiser ou changer de système.

L'utilisation quotidienne de la chaîne CESARS-MAPS montre qu'elle apporte une aide substantielle à l'ingénieur dans les différentes phases de l'élaboration d'un projet :

- dessin du plan d'architecte et de coffrage,
- maillage du réseau et calcul statique,
- dimensionnement et dessin des plans d'exécution.

2 DESSIN DES PLANS D'ARCHITECTE ET DES PLANS DE COFFRAGE

La chaîne CESARS utilise les dessins effectués à l'aide de programmes de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) MEDUSA et AutoCAD. Ces deux logiciels possèdent de nombreuses potentialités graphiques et couvrent un champ d'application très vaste. Ils peuvent être utilisés d'une manière très efficace dans le domaine 2D pour l'élaboration des plans. De plus, ces systèmes sont dits ouverts, en ce sens qu'on peut leur adjoindre des modules facilitant ou automatisant certaines tâches spécifiques, lorsqu'on les applique à des domaines bien particuliers, comme celui de l'architecte ou de l'ingénieur. Dans le cas de notre société, nous avons développé le module NEPTUNE en complément de MEDUSA, pour faciliter considérablement certaines opérations qui se rencontrent fréquemment. Ainsi, ce module complète et spécialise les fonctionnalités de MEDUSA dans le domaine du bâtiment. Il comporte essentiellement les opérations suivantes :

- ✓ cotation automatique ;
- ✓ génération de la géométrie et des attributs graphiques des murs simples et composés ; fusion automatique

- des murs ;
- ✓ coupage automatique de la géométrie des murs pour l'insertion des portes et fenêtres ;
- ✓ génération automatique de symboles spécialisés (perçement, têtes de murs, embrasures) ;
- ✓ bibliothèque de symboles (installations sanitaires, portes, fenêtres, etc.).

Pour AutoCAD, la chaîne CESARS est compatible avec le module principal, ainsi qu'avec les programmes qui lui sont complémentaires dans le domaine du bâtiment, puisqu'ils créent tous un fichier graphique DXF.

Il en est de même des autres programmes de DAO qui produisent des fichiers DXF. Ce fait est particulièrement important puisqu'il permet à un bureau de reprendre un fichier de dessin qui provient d'une autre installation, même si les marques d'ordinateurs sont différentes. Le fichier DXF étant formaté, on peut le transférer d'une machine à une autre (par exemple d'un PC sur un mini-ordinateur) sans difficulté, à condition que les deux versions d'AutoCAD soient compatibles. Cela ouvre des perspectives intéressantes, puisqu'on peut échanger des données graphiques entre bureaux d'étude ou bureaux d'architectes.

En résumé, cette première phase consiste à dessiner le plan de coffrage (Figure 1) ou d'architecte (Figure 2), et à constituer la base de données graphiques pour la suite. A partir de là, il est plus simple de comprendre la suite du processus, car l'étape suivante consiste à transmettre la base de données graphiques aux modules de calcul, de dimensionnement et de dessin. Cette partie est faite à l'aide du module PLACIDE.

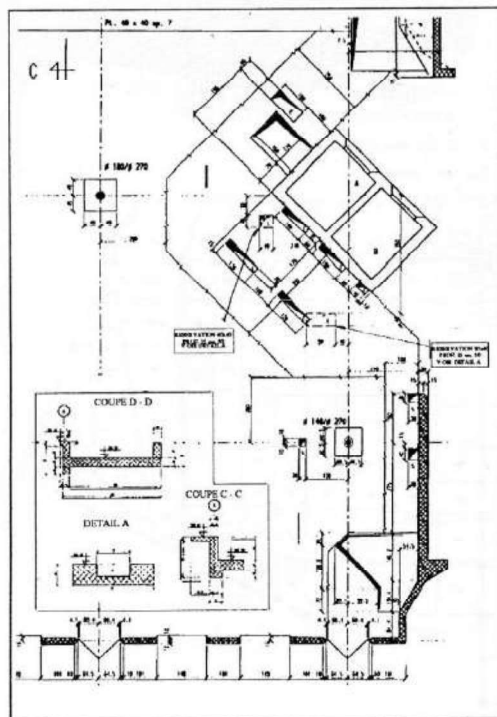


Figure 1 : Eléments d'un plan de coffrage et de détails de coupes à l'aide des logiciels MEDUSA [7] et NEPTUNE.

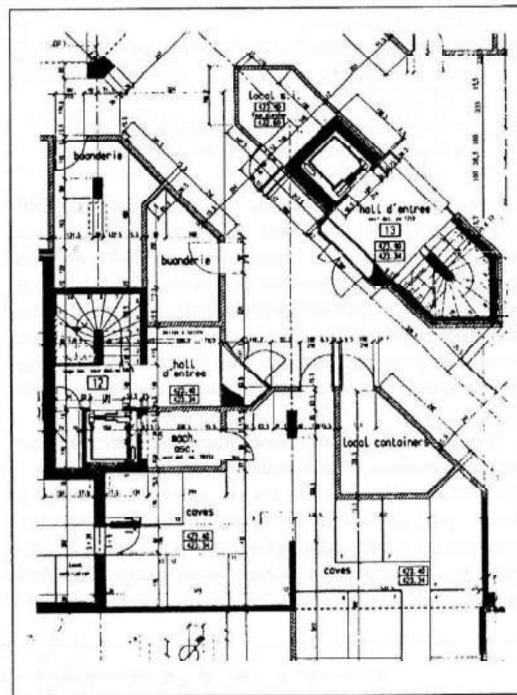


Figure 2 : Eléments d'un plan d'architecte dessiné à l'aide du logiciel MEDUSA [7] et NEPTUNE.

Ce programme a un double objectif :

- extraire du dessin d'architecte le plan de coffrage en sélectionnant essentiellement les données suivantes : murs porteurs, trous, sommiers, colonnes, contour de béton, cotations, traits d'axe, etc. ;
- 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.

De cette façon, on commence à entrevoir l'enchaînement logique des différentes opérations et le gain de productivité que cela assure au bureau d'ingénieurs, surtout au niveau "temps dessinateur". Nous aborderons cette question de la productivité en détail et d'une manière plus précise, une fois analysés un par un les différents éléments de la chaîne. Après cette première phase essentiellement graphique intervient la partie "calcul" proprement dite dont la première étape consiste à créer le maillage du réseau d'éléments finis.

3 GÉNÉRATION INTERACTIVE GRAPHIQUE DU RÉSEAU D'ÉLÉMENTS FINIS

La préparation des données nécessaires au calcul par éléments finis constituait un travail long et fastidieux puisque la description de la structure à calculer devait être transmise au programme sous forme de cinq groupes de données numériques :

- Les coordonnées (x, y, z) des nœuds du maillage,
- La numérotation des nœuds connectés à chaque

élément (topologie),

3. Les données géométriques et mécaniques (caractéristiques des matériaux, épaisseur, module de réaction du sol, etc.),
4. Les charges concentrées, linéaires ou réparties,
5. Les appuis et conditions de bord.

Dans la version précédente de la chaîne CESARS-MAPS, l'utilisateur disposait du générateur de réseau PREMAPS fondé sur un langage de commandes alphanumériques. Ce module possède de grandes potentialités de génération (ouvrages d'art précontraints, structures spatiales courbes, etc.) mais, en raison de cette puissance même, devient compliqué d'utilisation pour les structures relativement "simples" que rencontre l'ingénieur quotidiennement.

Pour les dalles, l'utilisateur travaillait avec un autre module employant la technique interactive graphique et la digitalisation. De cette façon, le travail s'exécutait de manière plus conviviale, en revanche il fallait digitaliser un par un les nœuds pour définir les coordonnées, et également les éléments (en piquant leurs quatre sommets) pour spécifier la topologie. C'est dans le but de remédier à

ces inconvénients que nous avons développé le module PEGASE, pour la génération interactive graphique du réseau d'éléments finis et des différents paramètres ou attributs (épaisseurs, charges, appuis, etc.) qui lui sont associés. Ainsi on apporte une solution à la principale faiblesse du programme MAPS, dont on disait (avec justesse à notre sens) que, si les modèles de calcul offrent de nombreuses potentialités, leur utilisation restait lourde à cause du manque de convivialité pendant l'introduction de données.

Cela était particulièrement vrai lorsque le MAPS n'était pas utilisé d'une manière continue et qu'on voulait calculer de temps en temps une structure relativement "simple" ; l'ingénieur, qui rencontrait fréquemment ce cas, était obligé de consulter le mode d'emploi à chaque reprise. Actuellement, on évite cette situation puisque le programme PEGASE permet la préparation interactive graphique des données nécessaires au calcul par éléments finis, pour les structures en barres, en treillis, en voiles (parois, murs), en dalles et en bâtiments (dalles ou radiers avec murs, sommiers, colonnes ou pieux). De cette façon on couvre la majorité des cas qui constituent le travail quotidien de l'ingénieur. Pour ce genre de structures, le

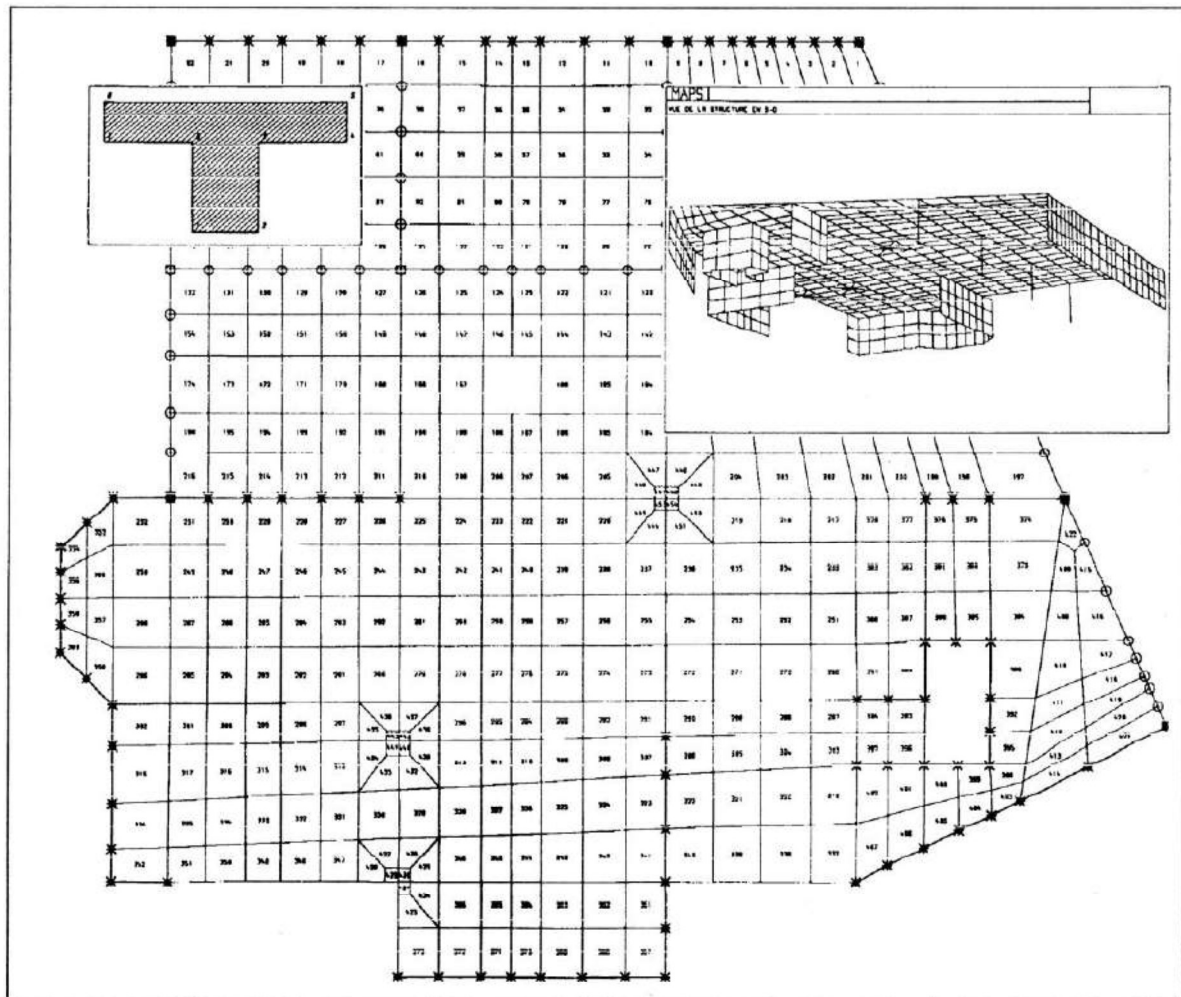


Figure 3 : Génération par PEGASE d'une dalle avec murs et colonnes.
(Réseau d'éléments finis, Vue en perspective, Section d'un sommier).

module PEGASE permet d'allier la convivialité de l'interactivité graphique, du menu et de la digitalisation, à la puissance du maillage automatique en générant les coordonnées des nœuds et la topologie des éléments en même temps. De plus, dans le cas du bâtiment, la génération se fait en trois dimensions (3D) puisque les murs et les colonnes ne sont pas remplacés par des attributs (appuis, milieu élastique) associés à une géométrie bidimensionnelle, mais effectivement modélisés par des éléments finis selon la troisième dimension. La question qui reste posée concerne l'ordre de la numérotation des nœuds et des éléments, ce qui peut avoir une répercussion importante sur les ressources informatiques (temps ordinateur, place mémoire, place disque) nécessaires au calcul par éléments finis. En effet, puisque l'utilisateur n'a plus de prise sur la numérotation, on aboutit dans la plupart des cas à une topologie entraînant une largeur de bande extrêmement éloignée de l'optimum. Or, comme la place de stockage est proportionnelle à cette largeur de bande et le temps de calcul proportionnel à son carré, il en résulte clairement qu'un tel générateur devient inutilisable dans la pratique, s'il n'est pas complété d'un module d'optimisation automatique de la largeur de bande.

En plus de ces caractéristiques fondamentales, le programme offre les possibilités suivantes, afin d'en faciliter l'utilisation (Figure 3) :

1. maillage automatique des dalles, parois et barres,
2. maillage automatique des murs, colonnes et sommiers (ces derniers pouvant passer à travers les éléments et non le long des bords uniquement),
3. corrections et modifications du maillage (élimination des éléments, déplacement des nœuds, etc.),
4. définition graphique des épaisseurs par zones (délimitées par une ligne polygonale) ou par groupes d'éléments,
5. définition graphique des sections des barres et des sommiers par lignes d'éléments ou par groupes d'éléments et visualisation des sections correspondantes,
6. introduction graphique des charges ponctuelles,
7. introduction graphique du poids propre et des charges réparties par zones (délimitées par une ligne polygonale) ou par groupes d'éléments,
8. définition graphique des charges linéaires par lignes polygonales (les charges linéaires peuvent passer à travers les éléments et non le long des bords uniquement),
9. définition graphique des appuis ponctuels, des appuis linéaires et des appuis sur sol élastique,
10. différentes possibilités de zoom avec notamment celle de travailler dans la zone agrandie.
11. lien automatique avec le module VERIDO pour :
 - a) visualisation de toutes les données introduites (maillage, épaisseurs, sections, charges réparties ou ponctuelles, appuis, etc.) ;
 - b) visualisation en perspective (avec élimination des lignes cachées) de la dalle avec les murs et les colonnes.

Cet ensemble d'opérations permet de définir entièrement le modèle d'éléments finis. On peut alors effectuer le calcul à l'aide du programme MAPS.

Cette phase est automatique et reste transparente à l'utilisateur. Seule la machine est sollicitée. Cependant, s'il n'est pas nécessaire de revenir sur les différents modèles de calculs contenus dans MAPS [2] (qui couvrent jusqu'aux structures complexes telles que les coques et les ouvrages d'art), il serait utile de présenter d'une manière succincte la partie concernant la statique du bâtiment.

4 CALCUL STATIQUE

Lorsqu'on aborde le calcul statique du bâtiment, la méthode classique consiste à isoler pour chaque étage la dalle correspondante, pour la subdiviser en éléments finis, en substituant aux colonnes et murs porteurs des appuis fixes. S'il est généralement admis que ce modèle suffit pour les besoins de la pratique, on constate cependant qu'un certain nombre de problèmes restent posés, en particulier au droit des porteurs. En effet, si on prend l'exemple d'un mur qui s'arrête au milieu de la dalle (un tel cas est fréquent dans la pratique) (Figure 4), on peut en principe le remplacer par une suite d'appuis fixes :

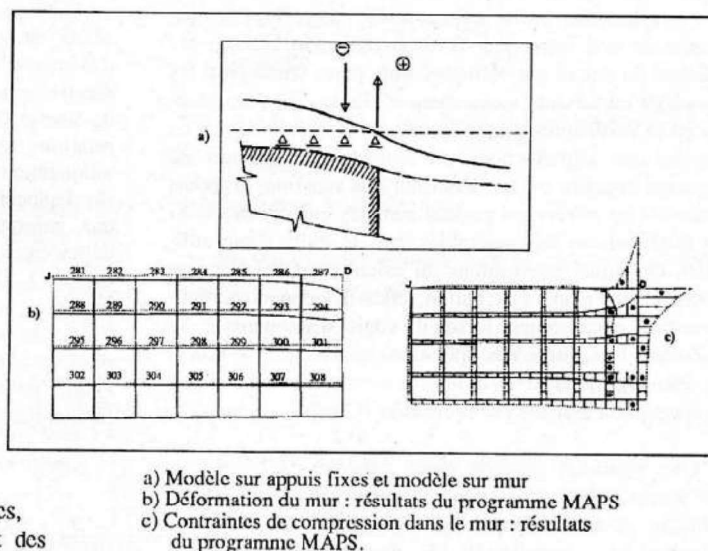


Figure 4 : Déformation d'une dalle au droit d'un appui sur mur.

Sans entrer dans les détails théoriques [1], on peut constater immédiatement qu'il y a une grande différence entre la déformation d'une dalle reposant sur un mur élastique et celle d'une dalle où ce mur a été remplacé par un ensemble d'appuis fixes. En effet, alors que dans le premier cas le mur se tasse sur toute sa longueur sous l'effet d'une charge répartie (Figure 4a), dans le deuxième cas (Figure 4b) non seulement la dalle ne subit aucun tassement, mais en plus aura tendance à se soulever après le premier appui fixe, si bien que le deuxième appui devra exercer une réaction en sens inverse pour annuler le déplacement vertical. L'erreur ainsi introduite, ajoutée à d'autres considérations théoriques (en particulier le fait de remplacer des réactions réparties par des forces concentrées), explique pourquoi il est difficile de déterminer, à partir

des réactions d'appuis ponctuels, les efforts qui passent dans les murs porteurs. De plus, les moments de flexion dans la dalle au point d'arrêt du mur seront nettement surestimés par rapport à ceux qu'on obtiendrait en tenant compte du tassement du mur.

Un autre modèle consisterait à remplacer le mur par un ressort continu (milieu élastique exerçant une réaction proportionnelle en chaque point au déplacement vertical de la dalle, selon la relation $R = C.w$, où C est le module de réaction du mur). Le principal défaut de ce modèle est qu'il ne tient compte que de la rigidité à la compression du mur et néglige complètement sa rigidité au cisaillement.

De cette façon, il ne peut pas traduire la diffusion des efforts dans le mur (Figure 4c), ce qui conduit à sous-estimer considérablement la rigidité réelle de celui-ci et par voie de conséquence les moments de flexion dans la dalle. Cela ne constitue qu'une partie des problèmes soulevés par l'utilisation du modèle classique de dalle. Une analyse détaillée de ces problèmes, ainsi que leur impact sur les résultats, a été exposée dans [2]. Essayons de voir quelles sont les conséquences pour l'utilisateur.

La principale conséquence réside dans le fait que l'ingénieur doit interpréter et éventuellement corriger les résultats du calcul par éléments finis pour, d'une part, les compléter en faisant "manuellement" la descente des charges ou la vérification au poinçonnement, et d'autre part, en éliminer les imperfections en réduisant les pointes de moments négatifs ou en déduisant des réactions d'appuis ponctuels les efforts qui passent dans les murs porteurs. Si ces interventions sont tolérables dans le cadre d'une utilisation classique des résultats du calcul pour l'élaboration manuelle des plans d'exécution, elles deviennent particulièrement pénalisantes lorsqu'il s'agit d'automatiser au maximum l'ensemble des opérations en intégrant le calcul par éléments finis et le dimensionnement dans la chaîne de conception assistée par ordinateur (CAO).

Une première solution, pour remédier aux inconvénients du calcul classique du bâtiment et tenir compte de l'interaction dalle-porteurs, consisterait à modéliser l'ensemble de la structure à l'aide d'éléments "coques". De cette façon, on tiendrait compte à la fois des efforts flexionnels dans la dalle et les colonnes et des effets membranaires des murs. Si cette méthode permet théoriquement de résoudre convenablement le problème, dans la pratique, la complexité géométrique des dalles de bâtiment nécessite souvent l'utilisation d'un grand nombre d'éléments finis. Comme le calcul en coque se fait avec des nœuds à 5 ou 6 degrés de liberté (la place disque nécessaire étant proportionnelle au carré du nombre de degrés de liberté de la structure et le temps de calcul au cube de ce nombre), il apparaît clairement que l'on dépassera très vite les capacités des ordinateurs moyens dont dispo-

sent la plupart des bureaux d'ingénieurs.

Ces considérations, ajoutées aux problèmes théoriques exposés ci-dessus, nous ont amenés à développer un modèle spécialement adapté au bâtiment qui permet d'analyser l'ensemble dalle-murs-colonnes, et cela éventuellement sur plusieurs étages (Figure 5).

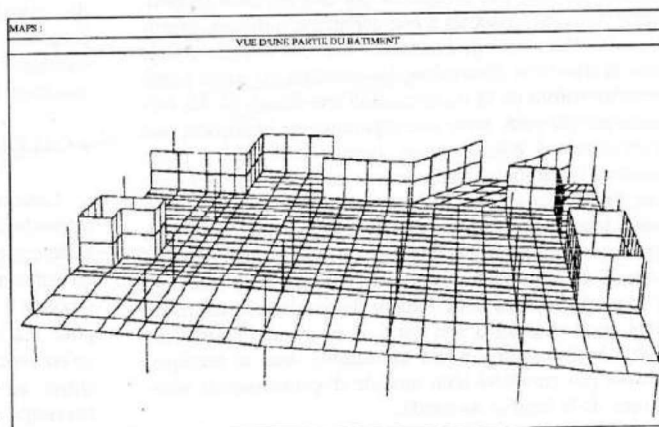


Figure 5 : Modèle de calcul pour le bâtiment.

Par rapport à un référentiel global X-Y-Z, on modélise la structure par la combinaison de trois types d'éléments : les dalles, les murs et les colonnes. Les nœuds connectés aux éléments dalles auront trois degrés de liberté (le déplacement w selon l'axe Z, et les deux rotations θ_x , θ_y , autour des axes X et Y) ; ceux connectés uniquement aux éléments murs auront un degré de liberté (le déplacement w) et enfin ceux connectés uniquement aux colonnes auront cinq degrés de liberté (les trois déplacements u , v , w , selon X, Y, Z et les deux rotations θ_x , θ_y). De cette façon, la compatibilité des déplacements est assurée entre ces trois types d'éléments finis. En revanche, les champs des déplacements et des déformations ainsi que les efforts seront différents d'un type à l'autre, permettant ainsi d'obtenir les efforts qui nous intéressent dans chaque partie de la structure (Figure 6).

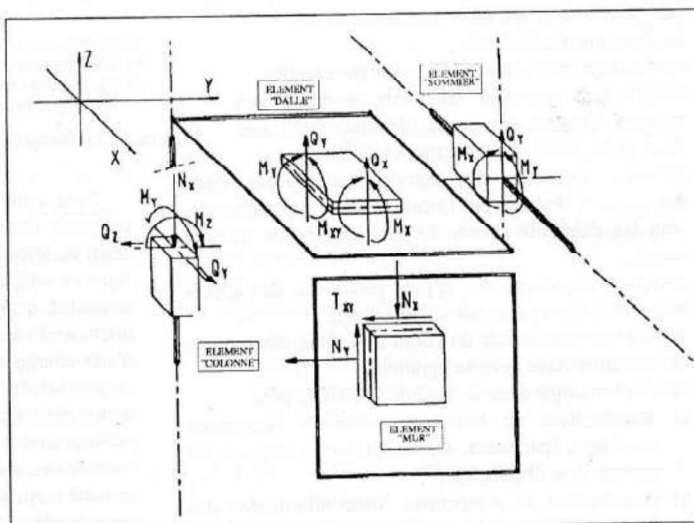


Figure 6 : Effort dans les différents types d'éléments (dalles, parois, sommiers, colonnes) constituant le modèle "bâtiment".

On notera en outre que l'on peut combiner aux dalles des éléments "grillage de poutres" pour simuler les sommiers. Pour les planchers nervurés, on peut utiliser également le modèle "dalle orthotrope" qui s'adapte bien à ce genre de structure.

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 et des déformées,
- ☐ 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.

Ce bref résumé de la partie "analyse statique" avait pour but de montrer comment le modèle par éléments finis s'adapte au calcul du bâtiment.

Ces développements ont été réalisés pour permettre une meilleure analyse du comportement de la structure dans une première phase, et un dimensionnement plus juste des aciers et du béton dans une deuxième phase. En effet, pour que la chaîne garde une certaine cohérence, il ne suffit pas d'améliorer la convivialité du générateur de réseau, étant donné que celui-ci ne représente pas une fin en soi, mais uniquement un moyen ; le but final est d'obtenir des résultats corrects concernant les efforts et les déformations. Si on reprend le modèle classique de calcul des dalles, la pratique a montré que les résultats des éléments finis surestimaient nettement les pointes de moments négatifs sur appuis. En appliquant les règles classiques du dimensionnement à ces efforts, on obtient des diamètres d'armatures largement surdimensionnés. En revanche, les zones soumises aux moments positifs sont sous-estimées, ce qui peut dans certains cas aller jusqu'à entraîner des désordres dans la construction (fissuration importante dans la zone de moments positifs) si les précautions nécessaires n'ont pas été prises au moment de l'analyse des résultats.

Une autre caractéristique d'un calcul adéquat par éléments finis serait de donner des résultats aussi complets que possible. En particulier, il devrait fournir les efforts (flexion, effort tranchant et torsion) dans les sommiers, les variations des moments lorsqu'il y a variation d'épaisseur ou décrochement dans la dalle, permettre une analyse du poinçonnement à l'aide des efforts dans les colonnes et les murs. L'ensemble des considérations exposées ci-dessus montre que le modèle de calcul de la chaîne CESARS-MAPS, s'il ne couvre pas toute la statique du bâtiment (effets différés, etc.), et s'il ne supprime pas le travail de réflexion et d'interprétation de l'ingénieur lors de l'utilisation des résultats, permet en revanche d'économiser du temps à ce niveau-là, ainsi que dans la phase du dimensionnement. Cet avantage représente un facteur non négligeable, quand il s'agit d'établir un bilan global de gain de productivité qu'apporterait aux bureaux d'étude l'utilisation de la CAO.

Un autre point, sur lequel on peut améliorer la productivité, concerne le dimensionnement.

Cependant, il faut bien préciser ce qu'on entend par dimensionnement. Il est clair que ce n'est pas le programme qui fixe les dimensions du béton, ou le diamètre des armatures. On comprend par programme de dimensionnement un module qui exécute certaines opérations classiques de calcul, que ferait l'ingénieur (manuellement ou à l'aide de tables). De plus, ce module représente sous forme graphique ces calculs, offrant un gain de temps indéniable et une aide pour l'ingénieur dans le choix de ses armatures ou la vérification des sections de béton.

5 DIMENSIONNEMENT

Dans le cas de la dalle, le programme DIOMEDE 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 :

1. Choix des paramètres de dimensionnement en mode interactif conversationnel.
2. Choix des couplets "diamètres-espacements" en mode interactif conversationnel.
3. Dimensionnement de la dalle selon les normes SIA 162 (1968) (calcul aux contraintes admissibles) ou selon les normes SIA 162 (1989) (calcul à la rupture), et sélection automatique des couplets "diamètres-espacements". Ce dimensionnement peut être effectué par zones (pour tenir compte des différences d'épaisseur ou de matériau) et selon des directions quelconques par zones.
4. Représentation graphique sur le fond de plan des armatures sélectionnées (Figure 7) (classe de hachures) et des moments de couverture admissibles (lignes isovales) pour les nappes inférieures et les nappes supérieures dans les deux directions (Figure 8).
5. Etudes de variantes de ferrailage.
6. Liaison avec le logiciel DEDALE pour le dessin de plans d'armatures.

En dehors de la dalle proprement dite, ce module permet également le dimensionnement des sections à la flexion oblique composée d'effort normal. Dans le cas du bâtiment, on peut l'appliquer aux sommiers et aux colonnes. Cependant, le module est plus général, puisqu'on peut introduire une section de forme quelconque, pouvant comporter des armatures, des câbles de précontrainte, des profilés métalliques et des trous. On peut calculer sous l'effet de deux moments de flexion (M_y , M_z) et d'un effort normal (N_x) l'axe neutre, la zone fissurée ainsi que la répartition des contraintes dans le béton et les aciers, et cela jusqu'à la rupture (Figure 9). En effet, on adopte, pour les différents matériaux, les lois contraintes-déformations non linéaires, telles qu'elles sont définies dans les normes SIA 162 (1989), ce qui permet d'aller jusqu'aux efforts de rupture de la section. D'autre part, si on se fixe un angle α que font entre eux les moments M_y et M_z (pour déterminer cet angle, on se fonde sur les efforts obtenus par le calcul statique), on peut obtenir pour différents diamètres d'armatures les courbes d'interaction (Figure 10) entre l'effort normal et les moments de flexion. Cela permet de

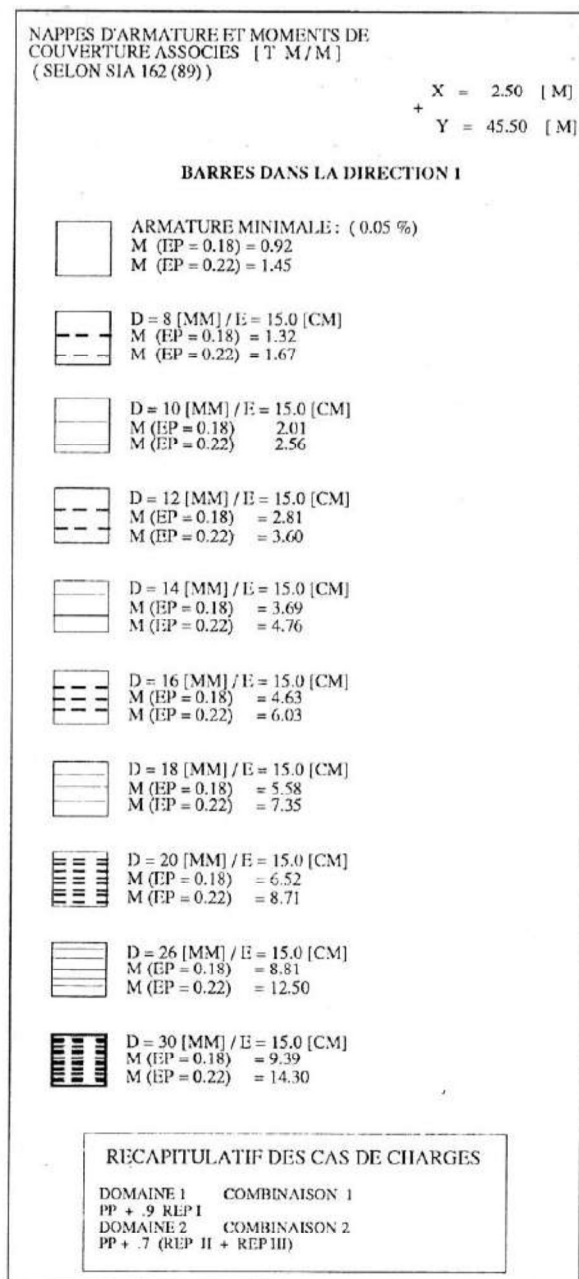


Figure 7 : Classe de hachures définissant les couplets "diamètres-espacements" et les moments de couverture correspondants pour deux épaisseurs de la dalle.

choisir les armatures pour que la section satisfasse au critère de sécurité tel qu'il est défini dans les nouvelles normes SIA 162 (1989).

Un autre élément important qui intervient dans le calcul du bâtiment et dont le module fournit une aide à l'analyse concerne le poinçonnement.

Pour une section de colonne et un contour de poinçonnement donné, le programme détermine la répartition des contraintes le long de ce contour, en se fondant sur les efforts obtenus par le calcul statique dans la colonne. Il détermine aussi la "résistance V_R qu'une dalle non pourvue d'une armature de poinçonnement offre au poinçonne-

ment centré dû à l'action d'une colonne", selon la formule des nouvelles normes SIA 162 (1989), ainsi que le coefficient de sécurité : $\gamma = V_R / V_d$.

A travers ce résumé, il apparaît clairement que le module de dimensionnement DIOMEDE 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 reste alors l'élaboration des plans d'exécution et des listes de fers.

6 DESSIN DES PLANS D'ARMATURES

Les fonds de plan (Figure 8), fournis par le module de dimensionnement, avec les classes de hachures correspondant aux différents "diamètres-espacements" (Figure 7), sont placés sur la tablette de digitalisation et servent de base pour le dessin à l'écran du plan d'armatures ou de treillis. Le programme DEDALE utilise la base de données contenant le fond de plan et les résultats du dimensionnement. Il propose à l'utilisateur, en fonction de la zone délimitée pour une nappe, un diamètre et un espacement pour couvrir les efforts dans cette direction. De cette façon, le module DEDALE permet le dessin des plans d'armatures (Figure 11), des plans de treillis et des coupes (Figure 12). Pour en faire un outil utilisable dans la pratique, il a fallu développer les potentialités suivantes :

- utilisation simultanée de la digitalisation des nappes sur tablette ou sur écran, du menu sur tablette, du graphisme interactif : l'un graphique-couleur, l'autre alphanumérique (pour la partie conversationnelle) ;
- agrandissement par zones (zoom) avec possibilité de travailler dans la zone agrandie ;
- façonnage des barres conforme à la recommandation SIA 165, avec possibilité d'introduire des formes spéciales et des treillis d'armatures ;
- positionnement et rectification des nappes en tenant compte des conditions locales (bords, murs porteurs, symétrie, etc.) ;
- génération et positionnement des annotations, réservant la possibilité d'une intervention de l'utilisateur ;
- dessin entièrement automatique des listes de fers (Figure 13) ;
- lien avec les programmes de DAO (MEDUSA, AutoCAD) pour divers compléments aux plans d'exécutions.

Après avoir parcouru l'ensemble des modules qui constituent la chaîne CESARS-MAPS, on peut mieux évaluer le gain de productivité (confirmé par l'utilisation) qu'une chaîne de CAO peut apporter aux bureaux d'étude. Ces gains se situent essentiellement aux niveaux suivants :

- ✓ partie dessin : reprise des fonds de plan et élaboration des plans d'armatures ;
- ✓ partie génération du réseau et interprétation des résultats du calcul statique : modèle d'éléments finis plus précis et plus complet que le modèle dalle simple ;
- ✓ aide au dimensionnement selon les nouvelles normes SIA.

En raison de ces différents points, nous pensons qu'actuellement l'utilisation de la CAO par les "petits" et

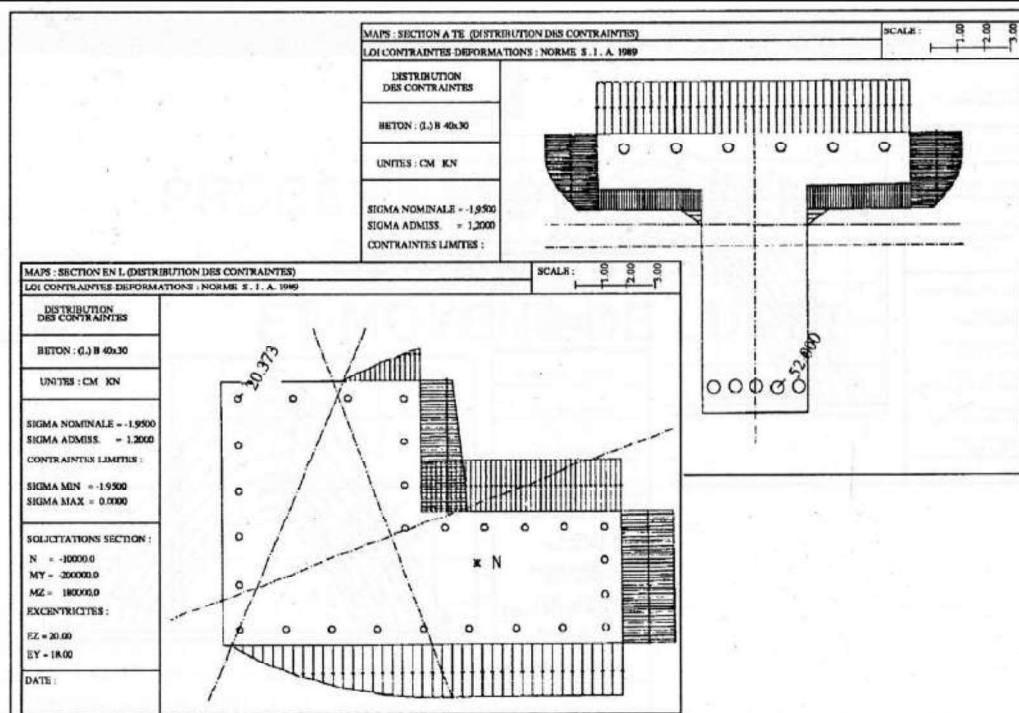


Figure 9 : Contraintes dans le béton et l'acier sous l'effet de la flexion composée d'effort normal.

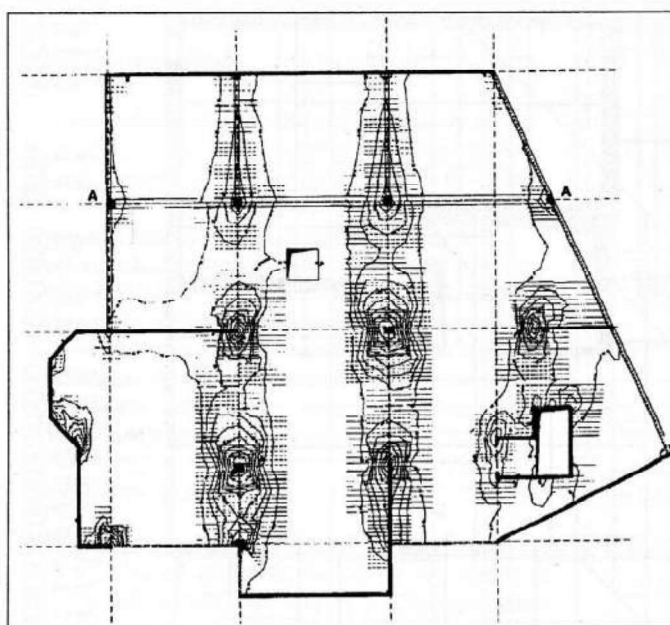


Figure 8 : Fond de plan pour le dessin des plans d'armatures (nappe supérieure direction 1) : classes de hachures donnant les diamètres-espacements et courbes isovales (mettant en évidence la discontinuité des moments au droit du changement d'épaisseur de la dalle le long de l'axes A-A) donnant les moments de couverture.

"moyens" bureaux d'étude est sortie du domaine de la théorie pour entrer dans les faits. Cependant, malgré les importants développements déjà effectués, il reste beau-

coup à faire. En effet, cette première génération de programmes, tout en résolvant un certain nombre de problèmes, a mis en évidence de nouveaux champs d'investigation par son utilisation pratique ainsi que par le contact permanent entre les ingénieurs du développement et ceux de l'application. Ces champs concernent d'une part les améliorations à apporter aux différents modules pour en faciliter l'usage, et d'autre part les élargissements à de nouveaux domaines d'application tels que les effets différés (fluage, retrait, etc.). Ces considérations expliquent les raisons pour lesquelles la société ITC Scritec SA a décidé de poursuivre et d'approfondir les recherches dans ce domaine, en espérant que cela représente un certain intérêt pour les ingénieurs en génie civil ①

7 BIBLIOGRAPHIE

- [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.
- [2] A. Bouberguig : *Calcul des coques nervurées et précontraintes par éléments finis avec pré- et post-processeur*, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, N°422, Série Théorie et méthodes de calcul 262, Paris, février 1984.

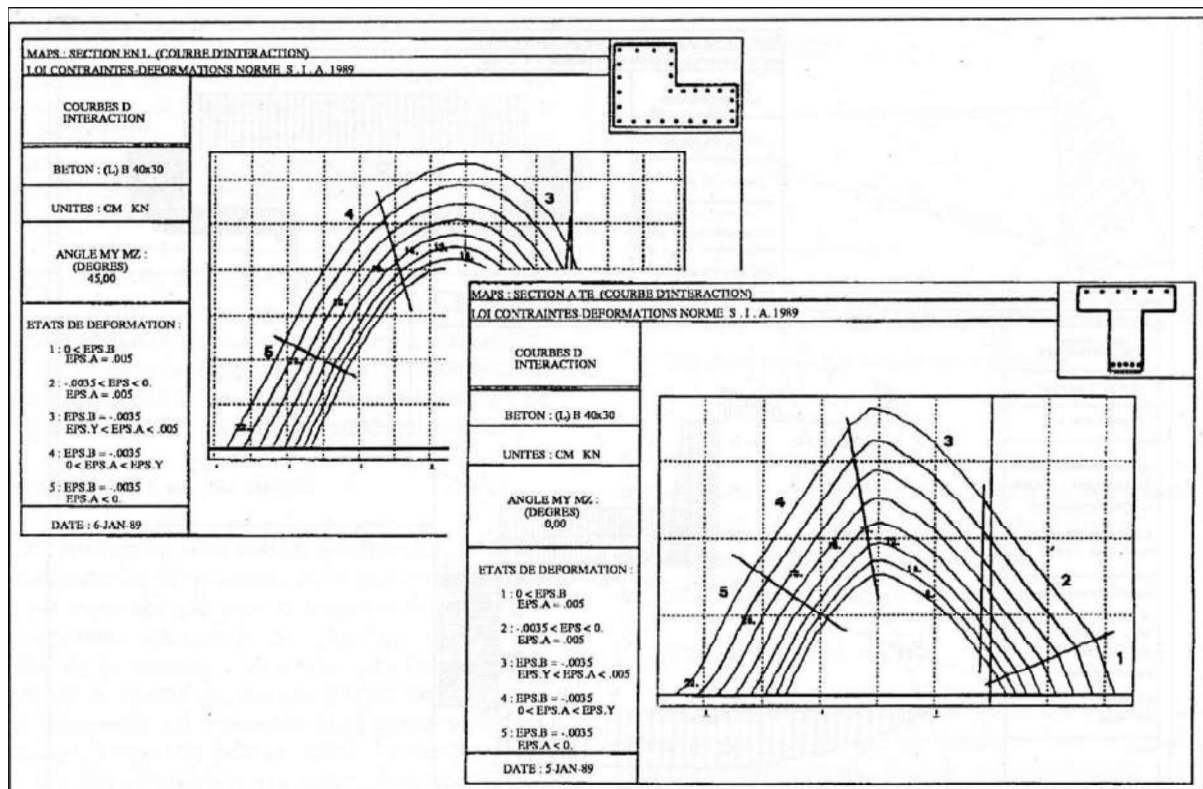


Figure 10 : Courbes d'interaction pour le dimensionnement à la rupture : section en T et section en L.

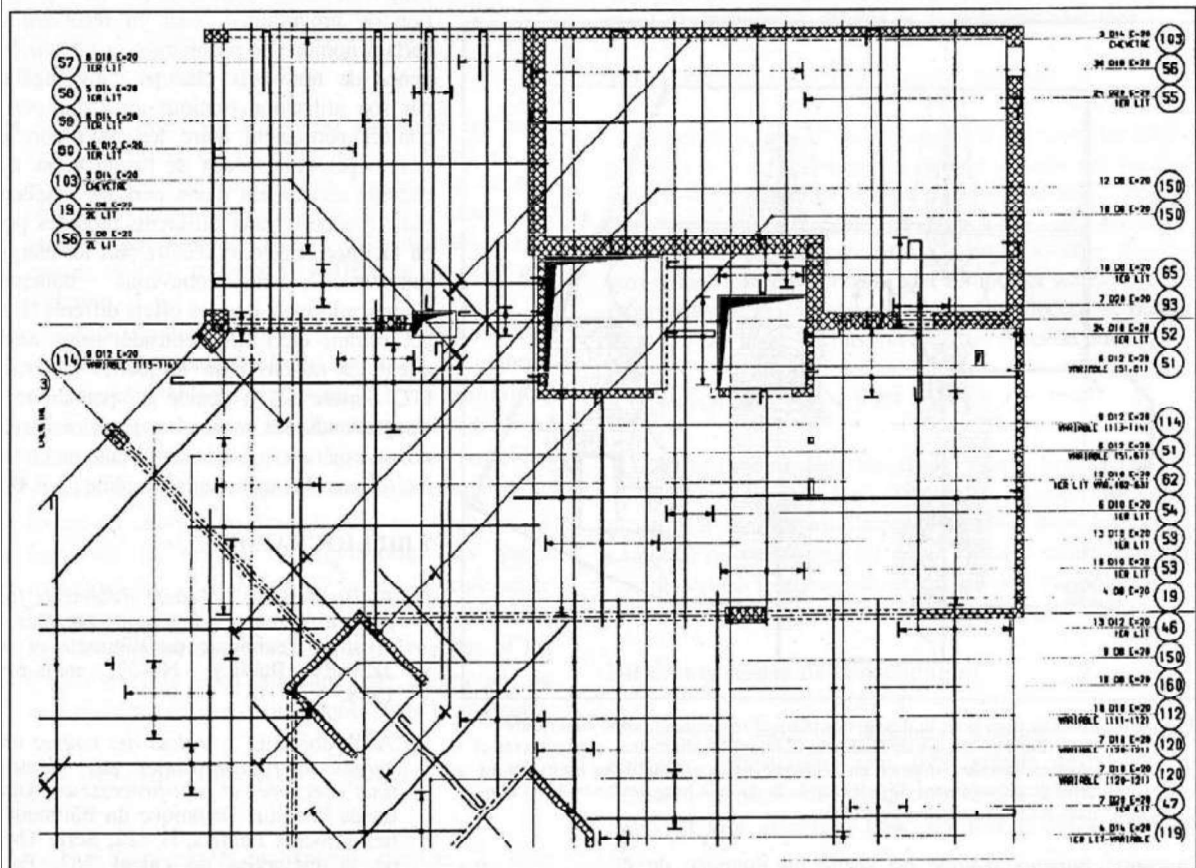


Figure 11 : Partie d'un plan d'armatures.

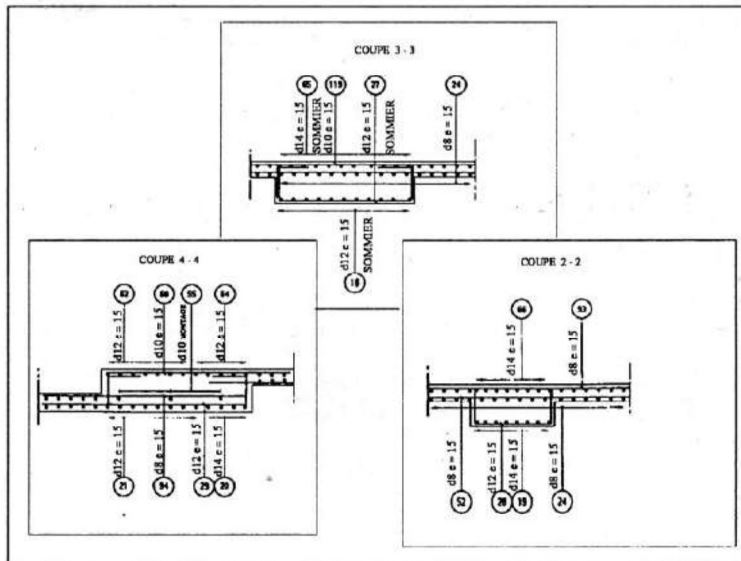


Figure 12 : Détails d'un plan d'armatures : coupes.

[3] P. A. Eperon : *La CAO et l'ingénieur civil, Application à la construction des bâtiments*, Chantiers, vol. 1, pp. 29-41, Suisse, janvier 1986.

[4] J. Jirousek : *Comment on evaluation of shear forces and reactions from transverse shear deformations by using isoparametric quadratic Mindlin plate elements*, Technical notes, Computer & Structures, vol. 19, N°5/6, pp. 899-903, 1984, USA.

[5] J. Jirousek, A. Bouberguig : *A contribution to evaluation of shear forces and reactions of Mindlin plates by using isoparametric elements*, Computer & Structures, vol.19, N° 5/6, pp. 793-800, 1984, USA.

[6] M. H. Derron, J. Jirousek : *Eléments spatiaux de barres courbes*, Publications I.S.B.S.E., 36-11, 65-87, 1976.

[7] *Prime Medusa : Design Drafting*, Prime Comp. Inc. Natick Massachusetts 01760, 1986, USA.

[8] *AutoCAD : Drafting Package*, Autodesk AG, Switzerland, May 1986.

						PLAN NO 313 - 412	LISTE D'ARM. NO 313	INGENIEUR STEF INGENIERIE SA	LISTE D'ARMATURE NO 313 - 413								
								PARTIE D'OUVRAGE DALLE SUR SOUS-SOL IM.M.B.4-B5 AXES 8-11		POUR LE PLAN NO 313-412 NAPPE INFERIEURE							
Pos.	Nombre de pièces	ø MM	OG	Long. DEV.	Long. DEV. TOTALE	KA	Façonnage (modèles extérieurs en CM) sauf indications spéciales les armatures sont placées selon la norme sia 162		DATE 15/11/88	ACIER SUISSE BARO-S BOX-UL TRA TOPAR 500S BOX-RING ROLL-K TORIP							
								FLEUR D'EAU				DESSINE					
								ADRESSE EXACTE VERS OIX				VERIFIE					
								ENTREPRISES REUNIES AMBROSETTI ET RELLONI				REVISE					
RECAPITULATION DE LA LISTE D'ARMATURES																	
# MM	LONGUEUR FIXES ET DE STOCK LONGUEUR M			POIDS PAR M KG/M		# MM	BARRES LONGUEUR M			POIDS KG							
6				0,222		6											
8	2897,63			1145.		8	1173,21			463.							
10	1064,05			657		10	1629,08			1005.							
12	955,32			848		12	63,10			56.							
14	250,05			303		14	823,02			996.							
16	268,95			425.		16	9,28			15.							
18	123,25			246.		18	106,16			212.							
20	18,60			46.		20	95,23			235.							
22				2,98		22											
26				4,17		26											
30	28.60			159.		30											
34				7.13		34											
40				9.87		40											
TOTAL LONGUEURS FIXES ET DE STOCK						3829.		KG	TOTAL BARRES FACONNEES ET DE STOCK						2982.		KG
NOMBRE DE POSITIONS (DANS LES LONGUEURS DE STOCK)						102		KG	TOTAL GENERAL						6811		KG
PANTIER DE SUPPORT (LONGUEUR : 2,5 M)												CHEVALETS		REMARQUES			
NOMBRE DE PIECES		LONG. TOTAL M		HAUTEUR CM		PIEDS PLASTIC AVEC SANS		NOMBRE DE PIECES		HAUTEUR CM							
						☐											
						☐											
						☐											
						☐											

Figure 13 : Liste de fers.