

**Jacques DUFAU**  
**Hervé GALLEY**  
**Jean-Claude MANGIN**

Laboratoire Génie Civil et Habitat  
Université de Savoie

---

**Intégration d'un modèle  
d'évaluation technique  
et économique  
de gros-œuvre de bâtiment  
dans un système de C.A.O.  
utilisant un système  
de gestion de base  
de données réseau**

---

## RESUME

---

Les systèmes de C.A.O. en Bâtiment sont susceptibles de servir notamment aux fins suivantes :

1. aide à l'élaboration d'une esquisse de bâtiment
2. évaluation d'une esquisse ou d'un Avant-Projet
3. réalisation des documents et plans d'exécution.

Nous nous limiterons à l'évaluation technique et économique d'esquisse ou d' Avant-Projet.

Après avoir brièvement défini les exigences auxquelles doit satisfaire un tel système et leurs conséquences quant à son organisation, nous traiterons successivement:

- d'un modèle d'évaluation technique et économique de gros-oeuvre de bâtiments à ossature en béton
- de son intégration dans un Système de Gestion de Base de Données (S.G.B.D.) de type réseau.
- de la modélisation de l'ossature du bâtiment et les modèles de calcul retenus.
- des modalités de définition du gros-oeuvre
- des scénarios d'évaluation du Gros-Oeuvre.

Les procédures correspondantes font partie d'un système de C.A.O., nommé X2A, en cours de développement au titre d'un contrat Plan Construction.

## SUMMARY

---

C.A.D. systems for building design can be used particularly for:

1. aid in elaborating building rough plans
2. rough plan or pre-project evaluation
3. plan and document production for the execution stage

We shall restrict ourselves to economic and technical evaluation for rough plans or pre projects.

After a brief definition of requirements associated with this kind of C.A.D. system and their consequences on its organisation we shall consider :

- a model for economic and technical evaluation for concrete made building structures
- its integration into a system using a network database
- the building structure modellisation and the associated calculus algorithms
- ways of defining the structure components
- processes for checking the structure

Associated routines are included in a C.A.D. system called X2A, presently in the development stage, supported by a French *Plan Construction* contract.

## 1. ORGANISATION DU SYSTEME DE C.A.O. BATIMENT

### 1.1 Exigences à satisfaire :

Parmi les exigences auxquelles un système de C.A.O. utilisé en Avant-Projet de Bâtiment doit satisfaire, nous retiendrons :

a) la multidisciplinarité : le projet doit être défini puis évalué tant du point de vue de l'architecte que du thermicien, de l'ingénieur structures, de l'économiste...

b) la cohérence des informations et des traitements

c) l'ergonomie et l'interactivité : le système doit permettre une manipulation rapide des données; les informations doivent être déduites automatiquement; les mises à jour du projet automatisées.

d) la rapidité : indispensable lors des études de volumétrie ou de variantes, c'est aussi une condition nécessaire de l'interactivité

e) la précision de l'évaluation : suffisante pour permettre le choix entre plusieurs variantes, et en tout cas au moins aussi bonne, à données équivalentes, que celle exigée d'un dossier d'Avant-Projet Détaillé (A.P.D.).

### 1.2 Conséquences

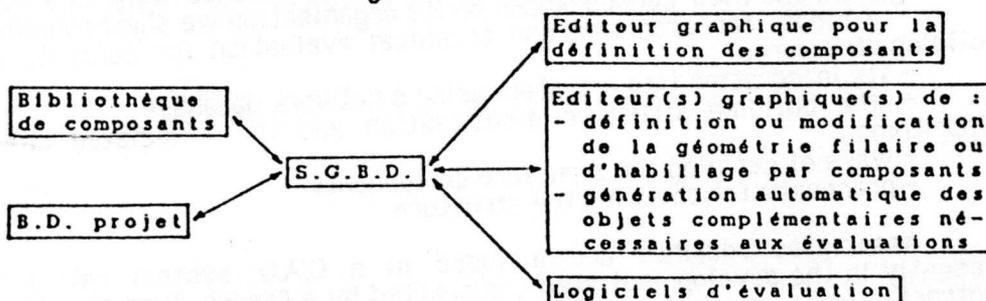
Les exigences ci-avant nous ont incités à utiliser :

a) un S.G.B.D. muni d'un langage de requêtes dans la B.D. utilisable dans les programmes d'application, notamment pour permettre l'extraction de sous-schémas conceptuels adaptés aux besoins des différentes disciplines.

b) une modélisation de la trame tridimensionnelle "filiale" unique pour tous les intervenants, aisée à manipuler, compatible avec les modèles de calcul de toutes les disciplines techniques.

c) un habillage de la géométrie filaire par composants (murs, portes, baignoires...) dont les attributs propres à chaque occurrence sont stockés dans la B.D. du projet courant, alors que leur représentation graphique et leurs attributs généraux sont stockés dans une B.D. distincte, dite "bibliothèque de composants", gérée par un éditeur spécialisé. La bibliothèque de composants est commune à toutes les disciplines.

Nous avons retenu l'organisation suivante :



Cette organisation est très modulaire. Le noyau essentiel, utilisé par toutes les applications, en est le S.G.B.D. avec son langage de requêtes, mais tous les autres logiciels sont distincts les uns des autres.

## 2. MODELE DE CALCUL DU GROS-OEUVRE DANS LE SYSTEME X2A

Au titre de l'évaluation technico-économique d'une esquisse ou d'un avant-projet, l'ingénieur doit juger la proposition architecturale selon divers critères : structure, thermique, acoustique.

Le point de départ commun est le même : la géométrie filiaire du bâtiment. L'ordre de traitement des études techniques est imprévisible.

Nous traiterons ici le cas de l'étude de la structure avec comme contrainte :

- l'obligation d'utiliser la géométrie définie par la saisie commune
- l'obligation de prévoir l'utilisation des objets de la structure pour d'autres études techniques.

Nous avons élaboré un modèle de calcul analytique permettant une descente des charges fournissant le cas échéant toutes les actions appliquées sur chaque ouvrage de l'ossature.

Nous avons essayé de rendre ce modèle de calcul le plus général possible (géométrie de l'ossature, possibilités de reports de charges, présence de matériaux autre que le béton armé) compte tenu de nos objectifs.

### 2.1 Modélisation de l'ossature : schéma conceptuel

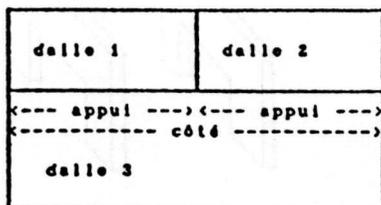
Un bâtiment est formé d'étages empilés. On appellera étage l'ensemble constitué d'un plancher du bâtiment, et des ouvrages (poutres et porteurs verticaux) immédiatement sous ce plancher.

Les étages consécutifs identiques forment un sur-étage.

Le plancher de chaque étage est formé de dalles polygonales. Une dalle est délimitée par ses bords libres, par les traces dans son plan des axes longitudinaux des porteurs verticaux et poutres au-dessous d'elle, et par les traces dans son plan des axes longitudinaux des porteurs verticaux au-dessus d'elle.

Une dalle est un polygone fermé ayant un certain nombre de côtés.

Les intersections des côtés des dalles définissent des appuis : un appui est commun à 2 dalles au maximum. Le schéma ci-dessous illustre la différence entre côtés et appuis :



Les appuis sont des entités purement géométriques (facettes verticales filaires d'un étage) dont on indique s'il s'agit d'appuis effectifs ou de bords libres. Les appuis effectifs sont "habillés" par des poutres ou des porteurs verticaux. Les appuis forment le lien entre la géométrie filaire du bâtiment, modélisée par facettes et les objets du gros-œuvre.

On désignera par poutre une travée de poutre, en console ou pas, éventuellement sans retombée. Une poutre peut habiller plusieurs appuis. Une poutre possède 2 extrémités.

On désignera par porteur vertical un mur porteur ou un poteau d'un étage.

Plusieurs schémas conceptuels relatifs au gros-œuvre sont susceptibles d'être définis à partir de cette modélisation ; celui que nous avons retenu peut, en ce qui concerne les objets et les principales relations entre objets, être résumé de la façon suivante :

Un bâtiment est formé de sur-étages, eux-mêmes formés d'étages. Un étage est formé de dalles, de poutres, de porteurs verticaux et d'appuis.

Une dalle est liée à ses côtés.

Une poutre est formée de 2 extrémités.

Les côtés, les poutres et les porteurs verticaux sont liés aux appuis.

## 2.2 Modélisation des reports de charges :

Notre objectif est de concevoir une modélisation suffisamment générale pour s'adapter à la grande variété des discontinuités verticales de l'ossature, très fréquentes dans les projets.

Il y a discontinuité verticale de l'ossature sitôt qu'un mur porteur ou poteau n'est pas entièrement appuyé sur un autre mur porteur ou poteau situé dans le même plan vertical. Le cas le plus fréquent est celui des grandes ouvertures en partie basse d'un mur porteur (figure 1). Les charges amenées par ce mur doivent alors être reportées sur d'autres ouvrages porteurs, pour être acheminées jusqu'aux fondations.

Le principe de la modélisation des reports de charges adoptée est le suivant : toute grande ouverture au-dessous d'un porteur vertical est supposée surmontée d'une poutre de reprise des efforts, éventuellement noyée dans le plancher, elle-même appuyée sur des porteurs verticaux (figure 1) ou des poutres (figure 2). Lors des calculs de ferrailage, l'ensemble (poutre de reprise "fictive" et mur au-dessus) sera considéré comme une poutre-voile si c'est possible (figure 1), évalué forfaitairement et signalé à l'utilisateur, pour examen approfondi, dans le cas contraire (figure 3).

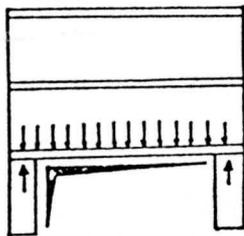


Figure 1

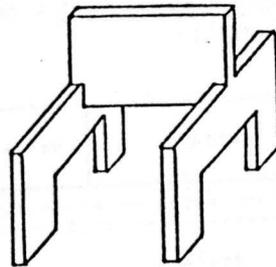


Figure 2

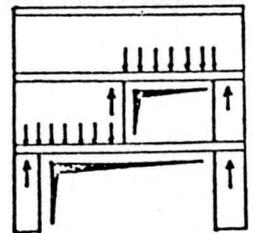


Figure 3

A chaque étage, l'ossature est donc modélisée par un ensemble de porteurs verticaux et de poutres, dont la trace au sol se superpose exactement avec celle des porteurs verticaux de l'étage au-dessus. Le cheminement des charges est toujours descendant.

La modélisation des reports de charges se traduit par les règles ci-après, relatives aux conditions d'appui des ouvrages (dalles, poutres, porteurs verticaux): L'utilisateur ou le système, avant d'effectuer la descente de charges, doit assurer la conformité de l'ossature à ces règles, essentiellement en implantant des poutres, qui peuvent être "invisibles" (sans retombée).

- a) Toutes les dalles autres que les balcons sont appuyées sur tout leur contour sur des porteurs verticaux ou des poutres.
- b) Tout porteur vertical est appuyé sur une suite ininterrompue de porteurs verticaux ou de poutres situés dans le même plan vertical que lui.
- c) Le contour extérieur de chaque étage, ainsi que celui des trémies, est formé d'une suite ininterrompue de porteurs verticaux ou de poutres.

Le modèle de report des charges ainsi élaboré permet de traiter la plupart des bâtiments courants à l'exclusion des cas nécessitant une étude par remontée des charges ou la prise en compte d'efforts horizontaux dans les linteaux.

### 2.3 Descentes de charges

La procédure générale est la suivante :

1. Saisie des charges rapportées sur les ouvrages sous toiture et sur les dalles.
2. Calcul des surfaces de dalles reprises par les côtés de celles-ci, des charges de plancher sur chaque appui. Cette procédure directement liée à la modélisation géométrique présente l'avantage d'être activable plus facilement et indépendamment des calculs techniques lors d'une modification.
3. Pour le calcul des charges deux approches sont possibles :

Descente de charges systématique : calcul des charges appliquées sur chaque ouvrage, étage par étage, du haut vers le bas.

Descente de charges locale : calcul des charges appliquées sur un ouvrage donné d'un étage donné.

### 2.4 Evaluation technique des ouvrages :

Les ouvrages ayant été implantés et les charges appliquées sur eux étant connues, il reste à vérifier le dimensionnement et à évaluer le ferrailage des ouvrages en béton armé.

L'évaluation des ouvrages porteurs horizontaux (dalles, poutres, poutres-voiles) comprend :

- la vérification du rapport hauteur sur portée (flexibilité)
- le calcul des sollicitations isostatiques
- la vérification de la contrainte tangentielle ultime
- le calcul des sections d'aciers correspondant aux différentes valeurs

possibles des moments sur appuis et en travée, (valeurs fournies par la méthode forfaitaire des règles B.A.E.L. 83, et utilisables lors de l'étude d'exécution dans le cas des bâtiments courants)

- la vérification du dimensionnement compte tenu de ces sections d'acier.

Quant aux porteurs verticaux (murs porteurs et poteaux), leur évaluation se traduit par :

- la vérification de l'élançement (flambement)
- le calcul de la contrainte de compression en service
- le calcul des sections d'acier réglementaires
- la vérification du dimensionnement compte tenu de ces sections d'acier.

### 2.5 Evaluation économique des ouvrages

Il s'agit d'évaluer le volume de béton et le poids d'acier à mettre en oeuvre.

La précision optimale est a priori obtenue en effectuant le calcul et le métré du ferrailage d'exécution des ouvrages. Mais notre objectif premier est de fournir des moyens d'évaluation en cours de conception du projet, lors de l'élaboration de l'A.P.S. par exemple, alors que ni le Bureau d'Etudes (B.E.) ni l'entreprise retenus pour l'exécution des travaux ne sont connus. Or les quantités d'acier utilisées dépendent étroitement de ces deux intervenants, de leurs méthodes de travail, de leurs moyens, etc.

Par exemple, le poids d'acier pour une poutre continue varie de 5 à 15 %, à l'exécution, selon le code informatique de calcul utilisé.

D'autre part, on ne saurait privilégier le seul critère de minimisation des quantités d'acier lors de l'évaluation de celles-ci, car d'autres critères antagonistes, comme la standardisation des ferrailages, ont un impact important sur la réalisation sur chantier, donc sur le coût.

Enfin, les temps de calcul requis pour déterminer les ferrailages d'exécution sont souvent prohibitifs en phase de conception précoce.

C'est pourquoi nous avons adopté une méthode d'estimation rapide de ratios de quantités unitaires d'armatures pour dalles, poutres, poutres-voiles, poteaux et murs, décrite par A. COIN (COIN 73). Par rapport à d'autres méthodes (THONIER 85), celle-ci présente l'avantage d'utiliser directement les calculs d'évaluation technique des ouvrages. Elle nous semble conduire à une précision meilleure que 10 %, plutôt par excès, dans la plupart des cas. Enfin, elle a été sanctionnée par la pratique des B.E. de Béton Armé.

### 3. PROCEDURES D'EVALUATION DU GROS-OEUVRE DANS LE SYSTEME X2A

Avant d'évaluer le gros-oeuvre, il faut le définir, c'est-à-dire implanter ou générer les dalles, poutres, murs, etc, stockés ensuite dans la B.D.. Ces opérations peuvent être effectuées par un logiciel spécialisé, interactif, appelé éditeur graphique.

Le Centre d'Informatique et Méthodologie de l'Architecture (C.I.M.A.) a développé un éditeur graphique orienté bâtiment et un S.G.B.D. réseau muni d'un langage de requêtes utilisable dans les programmes d'application.

Viennent ensuite les diverses opérations d'évaluation.

### **3.1 Modélisation et définition de la géométrie filaire (LEININGER 85) :**

Un bâtiment est formé de sur-étages, eux-mêmes formés d'étages. Un étage est formé de volumes élémentaires ("plus petits volumes"), ou unités volumiques, adjacents.

Un volume élémentaire est formé de facettes latérales, facettes plancher, facettes plafond.

Les facettes latérales coplanaires définissent des plans axiaux. Des unités volumiques adjacentes d'un même étage peuvent définir des sous-espaces standards (appartements par exemple).

Un sur-étage est appuyé sur un étage.

Un étage est appuyé sur un autre étage.

L'élément de base est donc la facette. Le lien entre cette modélisation et celle de l'ossature est l'appui : un appui est formé d'un nombre entier de facettes latérales porteuses consécutives et coplanaires.

L'éditeur graphique permet de définir interactivement la géométrie filaire du bâtiment, en 2D ou 3D, en employant les primitives graphiques auxquelles l'architecte est habitué, et en assurant automatiquement la cohérence de la géométrie filaire lors des modifications de celle-ci.

### **3.2 Manipulation des composants du gros-oeuvre**

Lorsque la géométrie filaire d'un étage du bâtiment a été suffisamment définie, on peut l'habiller par composants stockés dans la bibliothèque de composants, et définis au moyen d'un éditeur graphique spécialisé.

L'éditeur graphique distingue 3 sortes de composants : composants mous, durs, semi-durs.

- composant mou : sa largeur est invariante et stockée dans la bibliothèque des composants ; il est placé en pointant une facette et prend la longueur de celle-ci,

- composant dur : ses dimensions sont invariantes et stockées dans la bibliothèque des composants ; il est placé en pointant une facette, puis peut être déplacé,

- composant semi-dur : sa largeur est invariante et stockée dans la bibliothèque des composants ; l'utilisateur pointe ses 2 extrémités sur une ou plusieurs facettes alignées.

Les composants de gros-oeuvre sont les objets de gros-oeuvre placés par l'utilisateur lui-même. Ils sont semi-durs. Il s'agit des poutres et des porteurs verticaux (poteaux ou murs porteurs).

On peut distinguer deux manières de travailler :

- architecte : il place des pleins et des ouvertures
- ingénieur : il place des poutres et des porteurs verticaux.

L'utilisateur définit une valeur appelée portée critique d'ouverture telle que l'implantation d'une ouverture de portée supérieure est accompagnée, de manière transparente à l'utilisateur, de l'implantation d'un composant poutre lié à l'ouverture. En définissant une portée critique suffisamment grande, l'utilisateur pourra faire jouer à plein la règle "plein pour vide" : poutres et ouvertures seront complètement indépendantes.

Les remises à jour de l'habillage au cours de ces manipulations sont instantanées et automatiques (fusion des deux murs coplanaires encadrant une poutre lors de la suppression de celle-ci, par exemple).

Les modifications de la géométrie filaire, lorsque celle-ci est habillée, nécessitent en général de modifier l'implantation de certains composants. Le système propose plusieurs scénarios de mise à jour de l'habillage après déplacement d'une ou plusieurs facettes ; ces scénarios correspondent aux modifications les plus couramment pratiquées (translation de facette, etc).

Enfin, il est possible de lancer une procédure d'habillage rapide, par murs porteurs, de facettes pointées en série, ou de ne visualiser que les objets du gros-oeuvre.

### **3.3 Génération des objets du gros-oeuvre**

Lorsque l'utilisateur a placé les composants décrits ci-dessus et désire évaluer le gros-oeuvre, il lance depuis l'éditeur la génération des objets de gros-oeuvre. Celle-ci consiste à analyser la géométrie de l'ossature pour vérifier qu'elle est cohérente et conforme à la modélisation des discontinuités verticales et à générer automatiquement les objets de gros-oeuvre qui ne sont pas des composants : à savoir les dalles, les appuis, etc.

### **3.4 Gestion des calculs après modifications :**

Les seuls composants pris en compte pour la génération du gros-oeuvre sont les poutres, les porteurs verticaux et éventuellement les ouvertures. Donc toute modification de l'habillage portant sur d'autres composants est sans conséquence sur les objets de gros-oeuvre.

Les modifications portant sur des facettes porteuses ou des composants de gros-oeuvre entraînent des modifications du gros-oeuvre. Il est alors nécessaire de relancer la génération des objets de gros-oeuvre. Seuls les objets liés, directement ou indirectement, par les relations du gros-oeuvre, à ces facettes et aux composants qui les habillent, ou aux composants de gros-oeuvre modifiés, sont recalculés. Les attributs "charges" de ces objets sont ré-initialisés et seuls à être recalculés lors des descentes de charges, ce qui augmente la rapidité des calculs.

### **3.5 Métré de béton et quantités unitaires d'armatures :**

C'est la pratique actuelle du métreur. L'évaluation économique se traduit par le produit des quantités de béton et de quantités unitaires d'armatures par familles d'ouvrages, forfaitaires ou estimées par l'utilisateur.

### 3.6 Calcul détaillé d'ouvrage donné, et extrapolation :

Cette méthode rapide mais précise consiste à calculer les charges appliquées sur un ouvrage désigné par l'utilisateur et jugé représentatif, au moyen de la descente de charges locales, puis à effectuer un calcul détaillé de cet ouvrage. On peut alors étendre ces quantités aux ouvrages du même type (extrapolation), puis revenir à la méthode exposée ci-dessus (mètre de béton et ratios d'acier). Cette méthode est aussi appelée sondage.

Les données nécessaires au calcul de l'ouvrage (géométrie, charges) peuvent être obtenues de trois façons différentes :

a) l'utilisateur désire évaluer un ouvrage du projet sur lequel il est en train de travailler, de manière entièrement automatique : il désigne l'ouvrage, les données relatives à la géométrie de celui-ci sont lues dans la B.D., la descente de charges locale détermine les charges appliquées sur l'ouvrage, et celui-ci est évalué.

b) l'utilisateur n'est pas d'accord avec les valeurs des charges ainsi calculées : il fournit lui-même les valeurs des charges.

c) pour avoir un point de comparaison, ou parce qu'il se sert du logiciel indépendamment d'un projet donné, l'utilisateur introduit lui-même la géométrie et les charges de l'ouvrage à calculer.

Pour affiner l'évaluation par sondage, l'utilisateur pourra utiliser des logiciels de calculs d'exécution de poutres, planchers, etc, qui devront intégrer son savoir-faire et les conditions probables de réalisation sur le chantier

### 3.7 Calcul détaillé de tous les ouvrages du bâtiment

La descente de charges systématique est effectuée, étage par étage. Elle fournit la nomenclature des charges appliquées sur chaque ouvrage du bâtiment, et des réactions d'appui correspondantes.

## CONCLUSION

Il est possible d'améliorer les modules d'évaluation technique et économique de chaque type d'ouvrage, en les faisant tendre vers la précision des calculs d'exécution, compte tenu des réserves déjà évoquées et relatives à l'intégration du savoir-faire du B.E..

Les modules de calcul techniques par un B.E. de Béton Armé, indépendamment du système X2A, par exemple en employant un logiciel de Dessin Assisté par Ordinateur (D.A.O.) générant des fichiers de données organisées et accessibles, puis un logiciel d'interface servant à déduire de ces données, et à stocker sur fichiers, les informations nécessaires à l'évaluation du gros-oeuvre. L'emploi d'un S.G.B.D., muni d'un bon langage de requêtes, pour gérer ces différents fichiers constitue une aide très appréciable, voire indispensable dès que la taille du projet ou du code est importante.

L'intégration d'une évaluation du gros-oeuvre, de type analytique, dans un système de C.A.O. Bâtiment multi-disciplines, est grandement facilitée lorsqu'on dispose d'outils de manipulation de l'information, à savoir S.G.B.D. et

langage de requêtes, adéquats.

Leur disponibilité croissante sur le marché, jointe à l'existence de logiciels de D.A.O. performants, de normes internationales en matière d'informatique graphique, et à la commercialisation probable dans les années à venir d'éditeurs graphiques orientés Bâtiment, nous laisse penser que l'utilisateur qui le souhaite peut fabriquer lui-même, à partir de ces outils de base, des applications de C.A.O. exactement adaptées à ses besoins.

### **BIBLIOGRAPHIE**

PEPIN (1985) - Introduction aux Systèmes de Gestion de Bases de Données. Editions Eyrolles, collection Informatique et Entreprise, 1985.

A. COIN (1973) - Ossatures des bâtiments. Editions Eyrolles, 1977.

H. THONIER (1985) - Détermination des quantités d'acier pour dalles, poutres, poteaux, semelles et escaliers en Béton Armé. Annales de l'ITBTP, série Béton, n° 81 61156 00 223 75 01, septembre 1982.

J.P. LEININGER (1985) - Les utilitaires et systèmes de C.A.O. dans le domaine de l'architecture. Mémoire de diplôme d'architecte, Ecole d'Architecture de Paris-Villemin, 1985.

H. GALLEY (1986) - Un modèle d'évaluation technique et économique de gros-oeuvre de bâtiment, intégré dans un système de C.A.O. utilisant un S.G.B.D. réseau. Thèse de Doctorat en Génie Civil en préparation, laboratoire Génie Civil et Habitat, Université de Savoie.

Jacques DUFAU  
Hervé GALLEY  
Jean-Claude MANGIN

Laboratoire Génie Civil et Habitat  
Université de Savoie  
BP 1104 - 73011 CHAMBERY Cedex  
Tél : 79-69-27-18