

SYSTÈME EXPERT POUR LA CONCEPTION, LE PRÉDIMENSIONNEMENT ET L'ÉSTIMATION DU COÛT PRÉLIMINAIRE DES PONTS

N. LAMDOUAR (EMI)
M. ABOUSSALAH (EMI)

L'objectif principal de ce travail consiste à développer un Système Expert pour le choix, la conception, le prédimensionnement et l'estimation du coût préliminaire des ponts. Ceux-ci doivent répondre de plus en plus à des critères fonctionnels et d'esthétique, sujets à des contraintes de coût et de géométrie.

Ce domaine peu formalisé ou la connaissance s'exprime essentiellement sous forme de savoir faire est souvent difficile à modéliser par des algorithmes sûrs et définitifs et à traiter au moyen de méthodes informatiques traditionnelles.

Ainsi la combinaison des techniques de l'Intelligence Artificielle avec les capacités de la nouvelle génération d'ordinateurs a permis de contourner cette difficulté, mettant à la disposition des logiciels une masse importante de connaissances, incorporant à la fois l'expérience, l'intuition, le jugement et le mode de raisonnement des spécialistes. Cette approche est connue sous le nom de K.B.S. (Knowledge Based System), système à base de connaissance appelé également Système Expert.

Devant ce fait nouveau, il nous a paru opportun de mener des réflexions approfondies sur les applications potentielles de cette approche dans un domaine tel que celui des ouvrages d'art, et plus particulièrement celui des ponts.

MOTS CLES

Système Expert - Intelligence Artificielle - Ouvrages d'Art - Ponts - Conception - Estimation - Coût - Tablier - Appuis - Fondations -

INTRODUCTION

Le Système Expert comprend schématiquement deux modules ; Un premier module de conception élaboré dans le but : D'une part, de structurer la connaissance en matière de conception des ponts afin de faciliter son apprentissage, de permettre aux experts dans ce domaine d'exploiter leur savoir-faire, le modifier et surtout l'enrichir et d'autre part, de servir de guide

dans le processus du choix du type d'ouvrage afin d'aboutir à la conception optimale recherchée. Ce premier volet nous a amené à définir dans une première étape les principaux paramètres et leurs influences sur le choix d'un type de pont. Ces paramètres se résument en trois familles de contraintes ; les contraintes naturelles, les contraintes fonctionnelles et les contraintes dimensionnelles.

Ensuite, un deuxième module intégrant le prédimensionnement et l'estimation a été développé. En effet, pour un franchissement donné, les différentes contraintes conduisent souvent à envisager plusieurs solutions au niveau de l'étude préliminaire.

A ce stade de l'étude, nous n'avons en général qu'une idée plus ou moins approchée des dimensions globales de l'ouvrage. L'estimation ne peut alors être effectuée de façon classique sur la base d'avant-métrés ; d'où la nécessité de mettre au point des méthodes d'estimation plus globales et plus rapides, mais suffisamment précises pour le but recherché au stade de l'étude de définition et de l'avant-projet. L'objectif général étant de faciliter par une formulation analytique simple l'établissement d'estimations fiables, leur contrôle et leur exploitation.

Cette estimation permettra dans de nombreux cas de comparer les coûts des tabliers des différentes variantes retenues comme solutions lors de la conception de l'ouvrage ; l'objectif étant de déterminer le type d'ouvrage le plus économique, capable de satisfaire le mieux possible à toutes les conditions imposées.

Les méthodes simplifiées que développe ce travail fournissent des éléments d'appréciation aisément utilisables. Mais, lorsqu'on les appliquera pour choisir des types d'ouvrages, on aura soin de ne comparer que ce qui est effectivement comparable et de ne pas oublier de prendre en compte tous les termes correctifs qui doivent intervenir dans une estimation complète.

Pour comparer le coûts de deux types d'ouvrages, cette méthode ne peut conduire normalement qu'à la conclusion que les estimations sont soit nettement différentes, soit pratiquement équivalentes. Une différence de l'ordre de 5% ainsi calculée ne pourra être considérée comme significative.

1 - CLASSIFICATION

Classification des Tabliers

Les tabliers de ponts sont classés de diverses manières.

- *Suivant la Nature de la Voie Portée* : on distingue, suivant leur destination les ponts-routes, les ponts rails, les ponts canaux et les passerelles.
- *Suivant le Matériau Principal dont ils sont Constitués*: le matériau utilisé dans la construction d'un pont devrait être celui qui répond le mieux à des critères de conception technique esthétique et économique. En outre il s'agit de prendre aussi en considération l'intégration de l'ouvrage dans son environnement. C'est ainsi que l'on distingue les ponts en bois, en pierres, en briques, en béton armé, en béton précontraint, en métal, les ponts mixtes en BA - Métal.
- *Suivant leur Fonctionnement Mécanique*: selon la disposition des éléments porteurs principaux, on distingue les ponts à poutres, les ponts en arc et les ponts suspendus.
- *Suivant leur Implantation en plan par rapport à l'axe de la voie franchie*. C'est ainsi que l'on distingue, les ponts droits, les ponts biais, les ponts courbes et les ponts de forme quelconque en plan.

La classification adoptée dans notre programme pour les tabliers est représentée dans la figure1.

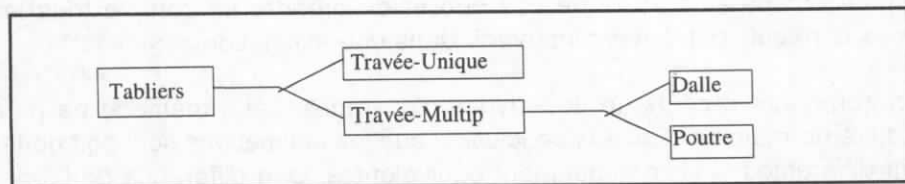


Fig 1: Hiérarchie du Module Tablier

Classification des Appuis

Les types d'appuis sont classés en trois catégories :

- Appuis constituées par des éléments longs ou voiles
- Appuis constituées par des éléments courts : colonnes, poteaux
- Appuis de forme composite (destinés plus particulièrement à des viaducs ou à certains ouvrages en site urbain)

Dans chacune des trois catégories, les formes peuvent être très variées, allant de la plus simple à la plus complexe. La forme la plus simple étant constituée par un parallélépipède rectangle pour les voiles, un cylindre à base circulaire pour les colonnes et un prisme à base carrée pour les poteaux. Les formes plus complexes dérivent de ces dernières, soit par adjonction de fruits sur certaines faces, soit par celle de plan supplémentaires en plus ou en moins grand nombre, soit par une combinaison de fruits et de plans.

La classification des appuis considérée dans le programme est représentée dans la figure 2.

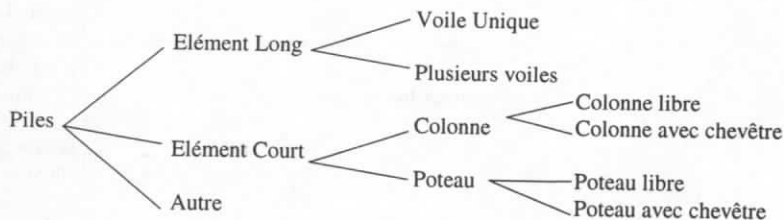


Fig 2 : Hiérarchie du Module Appui

Classification des Fondations

Trois grandes catégories de fondations peuvent être distinguées en fonction de la profondeur où se trouve la couche résistante .

- Les fondations superficielles
- Les fondations semi-profondes ou puits
- Les fondations profondes

La classification des fondations est représentée dans la figure 3.

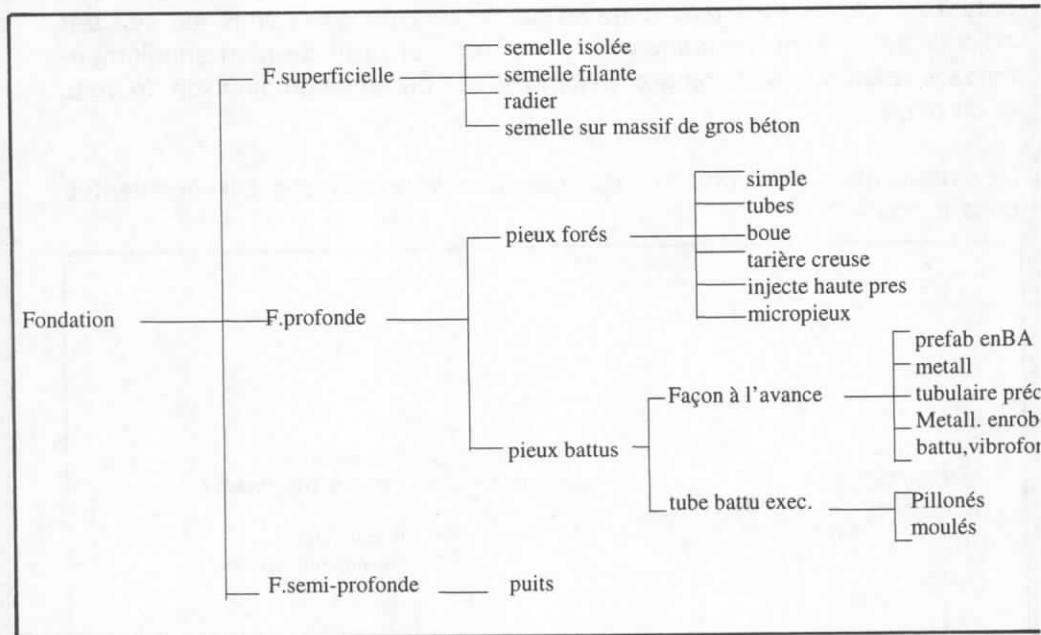


Fig 3 : Hiérarchie du Module Fondation

2 - PARAMETRES INFLUENCANT LE CHOIX

LES TABLIERS

De nombreux aspects sont à prendre en considération lors de la conception et le choix d'un tablier de pont . Parmi ces aspects, on cite les plus importants qui sont généralement des données naturelles et des contraintes fonctionnelles et dimensionnelles .

• Les Données Naturelles

Il s'agit lors de la conception de connaître de façon aussi précise que possible les données naturelles relatives au site . Ces données naturelles sont : les conditions hydrologiques et hydrauliques, géologiques, climatiques, et les conditions géographiques (montagnes, plaines, zones désertiques ou zone embouchure dans les océans).

• Les Conditions Dimensionnelles et Fonctionnelles

Elles sont fixées par le maître d'ouvrage. Elles concernent le type de circulation (route, chemin de fer, canal, piéton etc...), les caractéristiques géométriques de l'ouvrage, le type de surcharge à prendre en considération, le type de matériau à prévoir, les conditions esthétiques, etc ... Même si les formes de base des structures des tabliers de ponts sont simples et peu nombreuses, il existe une grande richesse de solutions dans la conception de l'ouvrage .

• Choix d'un Type de Tablier

L'objectif est de déterminer le type d'ouvrage le plus économique capable de satisfaire le mieux possible à toutes les conditions imposées . Les principaux paramètres intervenant dans le choix du type d'ouvrage sont l'ouverture de la brèche, la nature du sol de fondation, la destination de l'ouvrage, la configuration de la brèche, les profils en long et en travers, le débit maximal, la vitesse d'écoulement dans le cas d'une rivière et la nature de l'obstacle à franchir.

LES APPUIS

La conception et le choix des appuis sont liés à une multitude de paramètres d'importance et d'incidence variables auxquels peuvent s'ajouter éventuellement des contraintes liées à l'esthétique pour les appuis vus.

On remarque que l'étude des appuis est complexe, puisqu'elle a son origine à l'amont de celle du tablier, pour se terminer à l'aval de cette dernière. Les données et paramètres susceptibles d'intervenir dans la conception et le choix des appuis sont classés de la manière suivante: conditions fonctionnelles, conditions mécaniques, conditions économiques et conditions esthétiques.

• Conditions Fonctionnelles

Elles sont à la base même de l'étude des appuis et liées directement aux impératifs du franchissement. Le problème qui se pose est de savoir où l'on peut appuyer le tablier et comment. Les paramètres qui interviennent sont principalement d'ordre géométrique et sont énumérés comme suit : les tracés en plan des voies, les profils en long et en travers des voies ainsi que le tirant d'air sous l'ouvrage, la géométrie et la nature des terrassements aux abords de l'ouvrage et les contraintes d'implantation.

• Conditions Mécaniques

Les appuis concernés ont pour rôle principal de transmettre au sol des réactions verticales; ils seront en toute et bonne logique composés d'éléments essentiellement verticaux, à base de colonnes, de poteaux ou de voiles . Ce n'est que dans certains cas bien définis que l'on pourra s'écarter de cette règle.

Les autres conditions à prendre en compte sont la nature des liaisons en haut avec le tablier, la nature des liaisons en bas avec le sol, la continuité ou la discontinuité des éléments verticaux de transmission des descentes de charges, la nécessité d'assurer la rigidité dans le sens transversal, l'aptitude à résister à un choc éventuel de véhicule lourd et la possibilité de changer facilement les appareils d'appui.

• Conditions Esthétiques

A la différence des précédentes conditions fonctionnelles, mécaniques, économiques qui jouent le plus souvent un rôle déterminant dans la conception et le choix des appuis, la prise en considération du facteur esthétique est souhaitable dans tous les cas, mais à des degrés divers, selon le type d'ouvrage et son environnement.

Les appuis sont avec le tablier, l'un des principaux éléments vus des ponts; leur étude sur le plan de l'esthétique revêt donc une importance toute particulière, et leur réussite est déterminante dans l'aspect final .

• Choix d'un Modèle d'Appuis

Une fois les principales caractéristiques de l'ouvrage fixées (géométrie et type de structure du tablier, liaison tablier-appui, type de fondation, etc ...), l'étude des appuis se fera sur cette base .

Elle comporte trois phases :

- 1- choix du type morphologique
- 2- répartition à l'intérieur de l'enveloppe générale et recherche de proportions
- 3- choix d'une forme.

LES FONDATIONS

La conception générale de la fondation doit tenir compte principalement de trois éléments et assurer la cohérence du projet vis à vis d'eux ; ces éléments sont le site, le sol et l'ouvrage .

• Contraintes liées au Site

En site aquatique, il s'agit principalement des problèmes de débouché et d'afouillement : leur solution impose non seulement une bonne connaissance de la région, mais encore une étude hydrologique et une reconnaissance à base d'essais in situ poussées. Les problèmes d'exécution sont également à considérer. Ils sont en général prépondérants dans le choix du mode d'exécution et parfois même dans celui du type de fondation envisagé.

En site urbain, les problèmes de nuisance, d'encombrement et de délais seront primordiaux et conduiront souvent à adopter des solutions ad hoc, pour optimiser le coût total de l'opération. Il s'agit par exemple, de l'impossibilité d'effectuer des rabattements de nappe qui entraîneraient des tassements d'immeubles voisins.

En ce qui concerne les délais, en zone urbaine, plus qu'autre part, les délais seront un élément de contrainte primordial. L'imbrication des opérations, entre autres, nécessitera une étude approfondie de l'organisation des travaux en plusieurs phases.

En site hétérogènes, il n'y a évidemment aucune raison impérative qui pousse à recourir dans ces cas au même type de fondation pour chacun des appuis et l'on sera conduit, souvent, à prévoir des fondations hybrides, en fonction du problème posé par le sol et par les charges.

• Contraintes liées au sol

La connaissance du sol, matérialisée par une coupe géotechnique et géologique, permet de déterminer un certain nombre de niveaux de fondation possibles ou de préciser les zones impropres à l'implantation d'un ouvrage.

• Contraintes liées à l'Ouvrage

En fonction de la structure envisagée pour un franchissement donné, les exigences en ce qui concerne les fondations seront plus ou moins sévères. La situation de l'ouvrage en déblai ou en remblai peut avoir une incidence particulière sur le type de fondation à adopter à cause de la différence entre

états de contrainte avant et après la construction .

Il faut également considérer les problèmes de tassement différentiels qui peuvent se produire sous appuis différents, mais aussi entre deux extrémités d'un même appui .

En ce qui concerne la conception générale du projet, il est bien évident que le choix et la mise au point des fondations seront largement tributaires de la structure de l'ouvrage proprement dit .

• Choix du Type de Fondation

Le choix combiné d'un niveau d'appui et d'un type de fondation se fait par étapes successives. Les différents stades de dégrossissage sont, dans l'ordre:

- La recherche des niveaux de fondations possibles
- La recherche du ou des types de fondation applicables à chacun de ces niveaux
- Le choix de la solution à retenir

ESTIMATION PRELIMINAIRE DES TABLIERS

Une fois les conditions fonctionnelles et mécaniques satisfaites, il y a lieu de rechercher parmi toutes les solutions possibles celles qui s'avéreront les plus intéressantes du point de vue économique.

Compte tenu des difficultés liées à la détermination des coûts réels des ouvrages, nous avons établi une méthodologie approchée pour les estimer, à partir :

- d'un prédimensionnement basé sur des valeurs moyennes fréquemment utilisées.

- des courbes de prédimensionnement tirées d'une bibliographie technique appropriée.
- des courbes que nous avons établies par avant-métrés des projets existants d'un même type.

Cette estimation permettra dans de nombreux cas de comparer les coûts des tabliers des différentes variantes retenues comme solutions lors de la conception de l'ouvrage.

Pour chaque type de pont, la surface de coffrage Sc en m^2 , le volume de béton Vb en m^3 , le tonnage d'acier passif Ta en tonnes et le tonnage d'aciers actifs Taa (pour les structures en béton précontraint) sont déterminés en fonction des données caractéristiques du pont.

Ensuite, en faisant intervenir les prix unitaires d'exécution des matériaux, une estimation du coût du tablier au stade de l'étude préliminaire est obtenue.

Pour les cadres et les portiques, le tablier est indissociable des appuis; l'ouvrage est traité dans sa totalité. Pour les autres types, l'estimation est limitée aux tabliers.

Nous avons donc établi pour chacun des types suivants ; ponts cadres, portiques, ponts dalles et ponts à poutres en béton armé, ponts dalles, ponts à poutres et ponts caissons en béton précontraint ainsi que les ponts à poutres métalliques les courbes de variation de Sc , Vb et Ta en fonction de l'ouverture.

L'exploitation des courbes par le logiciel " Microcal Origin " nous a permis d'approcher leurs variations par des équations mathématiques qui donnent les expressions de Sc , Vb et Ta en fonction de l'ouverture.

Les courbes et les équations de prédimensionnement établies permettent une estimation rapide du coût des tabliers de ponts - routes au stade des études préliminaires.

Pour évaluer ce coût, le système élaboré laisse à l'utilisateur de ce dernier, le soin d'introduire ou de faire intervenir tout changement lié aux facteurs influençant le bordereau des prix unitaires.

Si les prix unitaires d'exécution sont tels que :

PBa : Prix unitaire du béton pour béton armé (DH/m3).

PBp : Prix unitaire du béton pour béton précontraint (DH/m3).

PAP : Prix unitaire de l'acier passif (DH/kg).

PAa : Prix unitaire de l'acier actif de précontrainte (DH/kg).

PC : Prix unitaire du coffrage (DH/m2).

PE : Prix unitaire d'échafaudage (DH/m2).

PAme : Prix unitaire de l'acier pour ponts métalliques.

Le coût en question est :

- Tabliers en béton armé ;

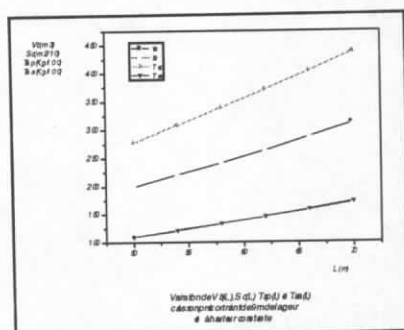
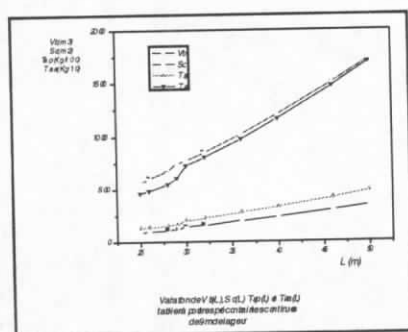
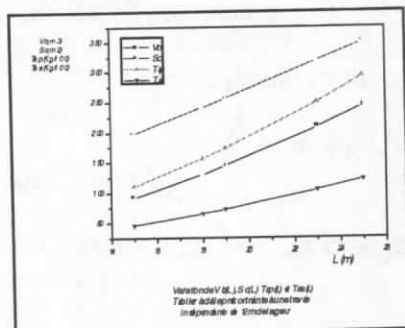
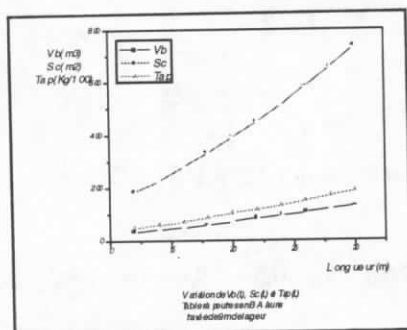
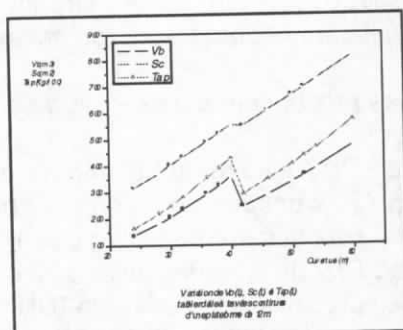
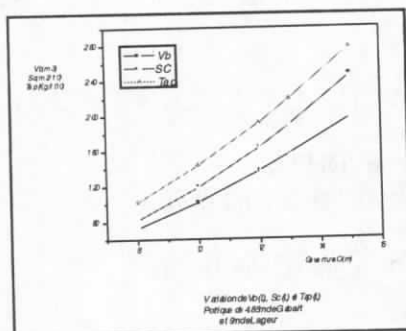
$$\text{Coût} = \text{PBa VB} + \text{PAP TA} + (\text{PE} + \text{PC}) \text{ SC}$$

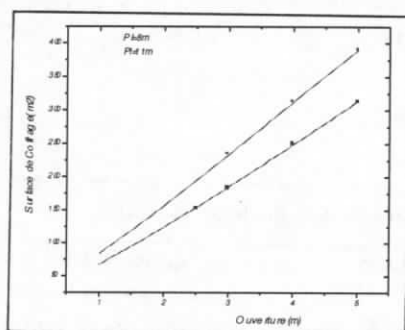
- Tabliers en béton précontraint;

$$\text{Coût} = \text{PBp VB} + \text{PAa TAa} + \text{PAP TAp} + (\text{PE} + \text{PC}) \text{ SC}$$

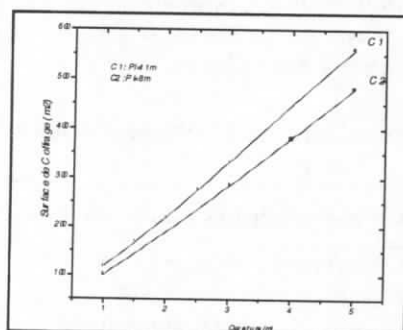
- Tabliers métalliques ;

$$\text{Coût} = \text{PAme TAp}$$

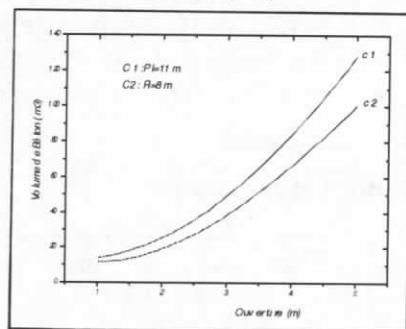




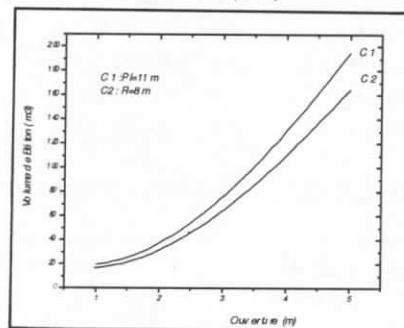
Variation de S_c ($H=1m$)



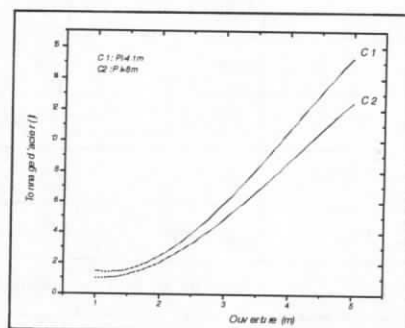
Variation de S_c ($H=3m$)



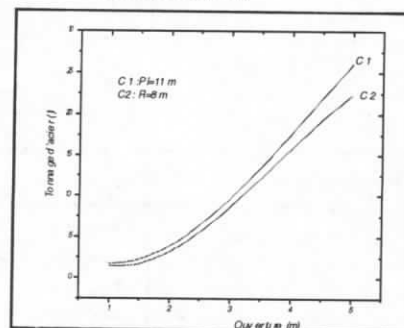
Variation de V_b ($H=1m$)



Variation de V_b ($H=3m$)



Variation de T_a ($H=1m$)



Variation de T_a ($H=3m$)

APPLICATION

Nous présentons dans ce paragraphe un exemple d'application concernant les modules conception et estimation, ceci afin de valider notre programme. Il s'agit du passage supérieur n°3 du CT2034 (pont franchissant l'autoroute Rabat - Kénitra).

Résultats de la phase conception :

Données générales relatives à l'ouvrage	Résultats de la phase conception
- Ouverture de la brèche : 76m - Nature de l'obstacle : Auto-Route - Largeur de la voie portée : 10m - Destination de l'ouvrage : Pont-route - Niveau de la ligne rouge : 9.75m - Largeur de la voie franchie : 27m - Largeur du terre plein central : 3.5m - Nature du sol de fondation : bon	1- Portée maximale adoptée # 24.5 m 2- Nbre de travées recommandé = 4 3- Solutions par ordre d'apparition : - a- Pont Dalle en BP continue pleine - b- Pont Dalle en BA continue allégée - c- Pont à Poutres en BA continues - d- Pont Dalle en BP continue allégée

Résultats de la phase prédimensionnement et estimation :

Devis quantitatifs	Poutres en BA continues	Dalle en BP continue pleine	Dalle en BP continue allégée	Dalle en BA contin. allégée
Volume de béton (m3)	294	665	491	480
Surface de coffrage(m2)	1702	893	884	900
Tonnage d'acier (kg)	41283	79800	58976	57608
Tonnage d'acier actif		32250	24573	
Prix du tablier (DH)	2.119.170	4.002.730	3.094.948	2.090.679
Prix des équipements	900.040	900.040	900040	900.040
PRIX TOTAL (DH)	3.019.210	4.902.770	3.994.988	2.990.719

Solution retenue par le bureau d'étude (CID) :

Pont dalle en béton armé continu de 4 travées :

14m + 23.40m + 23.40m + 14m

La solution retenue par le bureau d'étude correspond bien à celle recommandée par le système expert.

CONCLUSION

Le système élaboré appelé SEP a été représenté par un formalisme qui fait appel à la programmation Orientée-Objets et à la programmation Orientée-Règles. Il a été développé dans l'environnement micro-informatique Prokappa version 1.0.

Ce Système représente un guide efficace au concepteur, particulièrement à l'étape de l'avant projet pour le choix, la conception et l'estimation du coût préliminaire d'un type d'ouvrage adapté à un site donné et faisant intervenir les différents facteurs influençants un tel choix.

Des exemples de validation et d'applications ont été traités. Ces exemples ont porté sur plusieurs types de ponts qui diffèrent par leur nature et par leur destination. La confrontation des résultats obtenus aux réalisations in situ conduit à conclure que cette technique de base de connaissances peut être appliquée avantageusement à la conception et à l'estimation préliminaire des ponts.

Par ailleurs, cette étude a porté principalement sur l'élaboration d'une approche base de connaissances pour le choix, la conception et l'estimation préliminaire des coûts des ponts. Toutefois, elle pourrait être complétée par des connaissances relatives au diagnostic et à la réhabilitation des ponts. L'enrichissement des bases de données et de connaissances pourrait faire l'objet d'études ultérieures en vue d'ajouter d'autres nouvelles règles ou d'affiner des approximations de certains paramètres moins accessibles.

- [1] Daniel , H.V., Artificial Intelligence and Expert System, Chapman and Hall, 1986.
- [2] Lamdouar N., Aboussalah M., Système Expert pour la conception des ponts , CIMASI'96, ENSEM, 14-15-16 Novembre 1996.
- [3] "Kappa Users Guide", vers 1.0 Intellicop.Inc 1990.
- [4] Calgaro.J.A. et Virlogeux M., Analyse structurale des tabliers de ponts , Presse de l'ENPC, Paris, 1994.
- [5] CAD78, pièce I-5, DRCR,1980
- [6] Daimin A., Ouabba M., Approche base de connaissances pour l'estimation des coûts des tabliers de ponts, Projet de fin d'études, EMI, Juin 1996
- [7] Bernard Gely A. ET Calgaro J.A., Conception des Ponts Presse de l'ENPC Paris, 1994.
- [8] Georges J., Guide d'estimation des ouvrages d'art, DRCR, 1993
- [9] Sallami A., Elaboration d'un système expert d'aide à la conception, au prédimensionnement et à l'estimation du coût préliminaire des tabliers de ponts, Thèse, FSK, 1997