



ÉVALUATION, VÉRIFICATION ET CONCEPTION DE STRUCTURES À L'AIDE DE TECHNOLOGIES MODERNES

Rachik Elmaraghy, M.A.Sc., ing., Louis Maltais, M.Sc., ing., David Langis, M.Sc.
Société Informatique SAFI Inc.

RÉSUMÉ : L'ingénieur en structure se voit confronté au cours de sa carrière à d'importants défis durant toutes les phases de son interaction avec les projets d'infrastructures publiques et les projets en structures de tous genres en vue de répondre au besoin du développement économique des marchés modernes. Le but de cet article est de présenter une technologie intégrée pour traiter des projets en question et dont les composantes technologiques s'utilisent selon les besoins des divers aspects du projet de structure et par des utilisateurs possédants des connaissances et expertises variées. Un exemple d'évaluation d'une poutre de pont en béton armé sera présenté en appliquant la nouvelle norme CAN/CSA-S6-2000. Les résultats des calculs de résistance en flexion et en cisaillement de cette poutre seront présentés. L'interaction entre les diverses composantes technologiques que sont le module d'évaluation de ponts et la calculatrice de béton armé sera aussi présentée de manière à démontrer les diverses possibilités que les technologies modernes offrent pour solutionner un problème. Cet exemple présente aussi une méthode pratique pour réduire des problèmes complexes en sous-systèmes simples permettant d'améliorer et de faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats.

1. INTRODUCTION

Depuis 1986 notre entreprise se spécialise dans le domaine de la conception de logiciels de structure. Le logiciel est conçu de manière à intégrer un grand nombre d'applications structurales soit les bâtiments industriels et commerciaux, les ponts, les ponts acier-bois, les postes électriques, les tours de transmissions, les structures tubulaires et bien d'autres types de structures spécialisées. Des matériaux normalisés ou personnalisés peuvent aussi être utilisés tels l'acier, le béton, le bois et l'aluminium.

Plusieurs normes de conception sont supportées pour les diverses disciplines telles que pour l'acier à l'aide des normes CAN/CSA S16.1-94 et une partie de CAN/CSA S136-94, des normes américaines ASD-89 et LRFD-94 ainsi que de l'Eurocode 3 et 4. Pour le béton armé, sont supportées les normes CAN/CSA A23.3 et ACI 99 et autres. Pour ce qui est des ponts, le logiciel supporte la norme CAN/CSA S6-2000 incluant le chapitre 14 pour l'évaluation des ponts. Pour les tours de transmissions et les structures tubulaires le logiciel supporte les normes ASCE-52 et ASCE-72. D'autres normes sont en développement pour le bois et l'aluminium. La méthode simplifiée d'analyse sismique du Code National du Bâtiment est aussi grandement automatisée.

Le logiciel est utilisé pour des applications très variées soit dans le domaine du bâtiment en acier ou en béton armé, pour l'analyse de dalles par éléments finis. Le logiciel de structure d'acier est utilisé par les entreprises de génie conseil et les entreprises de fabrication telles que la plupart des divisions de Canam Manac et les membres du Réseau Acier Plus au Canada et aux États-Unis. Dans le domaine de la conception et de l'évaluation des ponts le logiciel est utilisé par les entreprises de génie conseil, les entreprises de fabrication, le Ministère des Transports du Québec, le Ministère des Transports du Nouveau Brunswick, la voie Maritime du Saint-Laurent, etc. Dans le domaine des tours de transmissions et des postes électriques, le logiciel est utilisé par les ingénieurs d'Hydro-Québec, les entreprises de génie conseil, le ministère de l'électricité d'Égypte, etc.

Le logiciel est conçu d'une manière tout à fait intégrée de sorte que la plupart des fonctions servent en général à presque tous les utilisateurs et certaines fonctions spécialisées se voient utilisées pour des applications plus spécifiques. Ainsi, l'ingénieur peut utiliser le produit pour plusieurs types d'applications différentes selon le besoin et ainsi se concentrer sur les travaux d'analyse, de conception, de réfection ou d'évaluation. Le logiciel est aussi un produit fort utile pour la formation des étudiants de niveaux collégiales ou universitaires.

Le logiciel se distingue par le fait que l'ingénieur peut utiliser indépendamment le produit principal pour la vérification, l'évaluation et la conception de structures, ou tout simplement utiliser les Calculatrices d'Acier, de Béton armé, de Fondations ou encore combiner les deux. La Calculatrice d'Acier s'est d'ailleurs vue décerner le prestigieux **Merit Award 2000** du meilleur produit de sa catégorie en Août 2000 par le magazine américain « Modern Steel Construction » de l'American Institute of Steel Construction.

Ces divers produits sont en réalité tout à fait complémentaires et peuvent s'utiliser simultanément afin de bénéficier au maximum des capacités et des avantages de chacune des composantes technologiques. Les développements en cours s'orientent vers une intégration totale de ces composantes. L'objectif visé est d'accélérer les prises de décisions par l'ingénieur et d'accroître la productivité et la qualité des projets de structure.

En vue de mieux expliquer certains aspect des composantes principales de cette technologie intégrée pour un usage selon les besoins, nous allons traiter d'un exemple d'application.

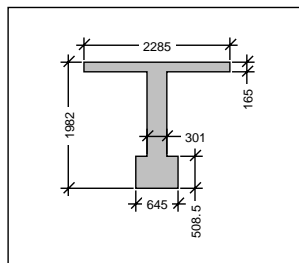
2. EXEMPLE

Cet exemple présente l'évaluation de la résistance d'une poutre de pont en béton. Nous allons compléter le modèle pour effectuer une vérification de la résistance du pont en tenant compte du chapitre 14 de la norme S6-2000 traitant de l'évaluation des ponts existants.

Les opérations effectuées lors de la création du modèle sont les suivantes:

2.1 Création du modèle

1. Édition des matériaux *Acier 345MPa* et *Béton 27.5 MPa*.
2. Création d'une poutre de 29406 mm.
3. Création d'une section et assignation de la section à la membrure.



4. Assignment des conditions d'appui.
5. Création des charges de bases statiques *Morte*, *Morte Add.* et des charges de bases mobiles *CL1*, *CL2*, *CL3*. Choix des facteurs d'impacts et des coefficients de distribution latéral.
6. Création des combinaisons de charges non-pondérées (la pondération des charges sera effectuée dans la section évaluation un peu plus loin).
7. Assignment des charges statiques uniformes *Morte*, *Morte Add.*

2.2 Paramètres généraux des ponts

1. Création d'une trajectoire.
2. Sélection des membrures de transfert.
3. Création des surcharges routières normalisée CL1-625A, CL2-625A et CL3-625A.

Une analyse de charges mobiles est effectuée pour cette poutre en béton armé. Les calculs de résistances de la poutre sont effectués selon les critères de la norme CAN/CSA S6-2000 en considérant les particularités du chapitre 14 concernant l'évaluation des ponts. La figure 1 présente les paramètres relatifs à la norme S6-2000 retenus pour cette analyse soit un niveau de sécurité normal, une travée de 10 mètres et plus, un comportement d'ensemble pour les appuis S1 (la rupture conduit à l'effondrement), un niveau d'inspection des appuis INSP3 représentant une inspection faite par l'ingénieur effectuant les calculs et un type d'analyse simplifié (analyse 2D).

Le camion CL1-625 est composé de 5 essieux respectivement de 50, 125, 125, 175 et 150 kN, le premier essieu étant de 50 kN. Le camion CL2-625 est composé de 4 essieux respectivement de 50, 125, 125 et 175 kN, le premier essieu étant de 50 kN. Le camion CL3-625 est composé de 3 essieux respectivement de 50, 125 et 125 kN, le premier essieu étant de 50 kN. Pour ces trois camions, la charge de voie est composée de 80% de la charge de camion et d'une charge uniformément répartie de 9 kN/m ce qui correspond à une route de classe A (CL-625A).

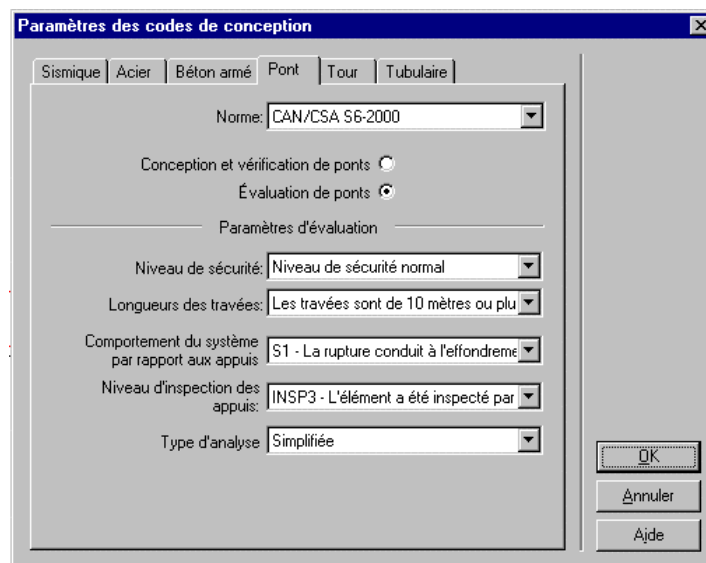


Figure 1 : Paramètres relatifs à la norme CAN/CSA S6-2000

2.3 Choix du camion

Trois charges de camion normalisées ont été créées afin d'effectuer l'évaluation du pont, soient les charges CL1-625, CL2-625 et CL3-625 de classe A. Les charges de base retenues sont résumées à la figure 2.

	Nom de la charge de base	Type de charge
1	Morte	Charge permanente
2	Morte add.	Charge permanente additionn
3	CL1	Charge mobile
4	CL2	Charge mobile
5	CL3	Charge mobile
6		

Figure 2 : Charges de bases utilisées pour l'analyse

Une identification complémentaire des charges de base déjà définies doit être effectuée pour les besoins particuliers de l'évaluation, puisque les pondérations de charge sont déterminées automatiquement selon le type de charge. La figure 3 présente les charges de base statiques et mobiles ainsi que l'identification requises pour les besoins de l'évaluation.

Charges statiques			
No. Charge	Nom de la charge	Identification	
1	Morte	Charge permanente - D1	
2	Morte add.	Charge permanente - D1	
Charges mobiles			
No. Charge	Nom de la charge	Identification	
3	CL1	Charge mobile - Circ. normale	
4	CL2	Charge mobile - Circ. normale	
5	CL3	Charge mobile - Circ. normale	

Figure 3 : Identification des charges de bases pour l'évaluation

2.4 Combinaisons de charges

Puisque les facteurs de pondération des charges sont variables selon le type de charges et les divers paramètres des éléments (comportement de l'élément E1, E2 ou E3) et des paramètres globaux, ils sont déterminés par le système lors de l'analyse. Ainsi, les combinaisons de charges définies par l'utilisateur doivent être non pondérées (facteur de 0 pour exclure une charge et facteur de 1 pour l'inclure).

Les facteurs de pondérations (α_D et α_L) des combinaisons de charges sont automatiquement calculés en fonction des paramètres suivants de la norme S6-2000:

- Art 14.11.1: Comportement du système (S1, S2, S3)
- Art 14.11.2: Comportement des éléments (E1, E2, E3)
- Art 14.11.3: Niveau d'inspection (INSP1, INSP2, INSP3)
- Art 14.11.4: Niveau de sécurité (Normal, Élevé)
- Art 14.12: Type de charge (morte D1, D2 ou D3; Camion)
- Art 14.2.3: Longueur des travées (selon le camion utilisé)
- Art 14.12.3.2: Type d'analyse (selon le camion utilisé)

Le facteur de pondération spécifié par l'utilisateur pour une charge de base dans la table des combinaisons de charges est multiplié le facteur de pondération calculé automatiquement (α_D ou α_L). Par exemple, si la valeur spécifiée pour une charge de base mobile est de 0.7, le facteur de pondération final pour cette charge à l'intérieur de la combinaison de charge spécifiée sera de $0.7 \cdot \alpha_L$.

No. Combinaison	Nom Combinaison	1 - Dead	2 - Add Dead	3 - CL1	4 - CL2	5 - CL3
1	CL1	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000
2	CL2	1.000	1.000	0.000	1.000	0.000
3	CL3	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000

Figure 4 : Combinaisons de charges

La pondération de l'effet des charges sur chaque élément du système est fonction du niveau d'inspection de chaque élément, du comportement d'ensemble de la structure en regard de la rupture de l'élément, du type d'état limite considéré (type de rupture) et de l'indice de sécurité du pont. Ces paramètres doivent être spécifiés pour chaque élément du pont à l'exception du type d'état limite qui est déterminé par le logiciel au moment de l'analyse.

2.5 Définition des barres d'armature

Pour spécifier l'armature d'une poutre, il est nécessaire de définir une configuration de barres. Cette configuration de barre peut être assignée à une ou plusieurs poutres. Pour cet exemple, trois type de configurations sont utilisées soit des barres d'armature longitudinales, des barres d'armature pliées et des étriers.

Les figures 5-a, 5-b et 5-c donnent un aperçu des barres d'armature de cette poutre.

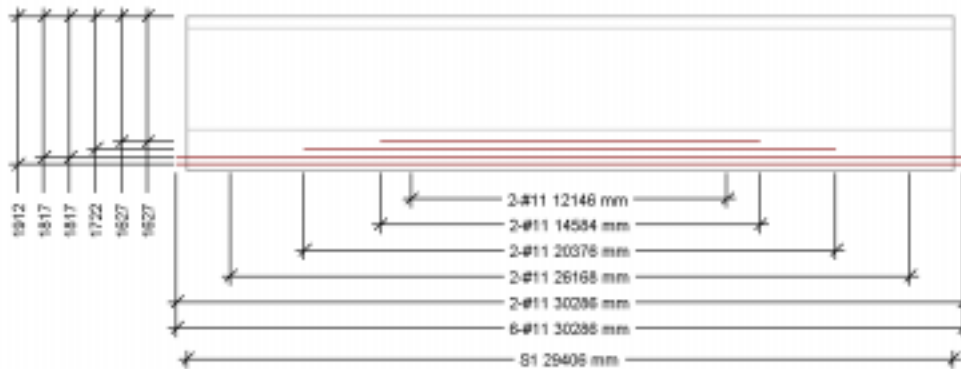


Figure 5-a : Armatures longitudinales

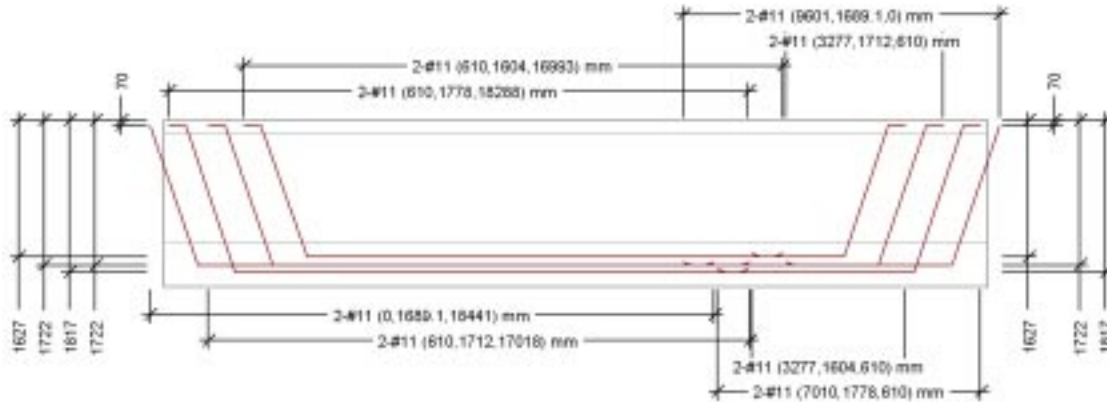


Figure 5-b : Armatures pliées

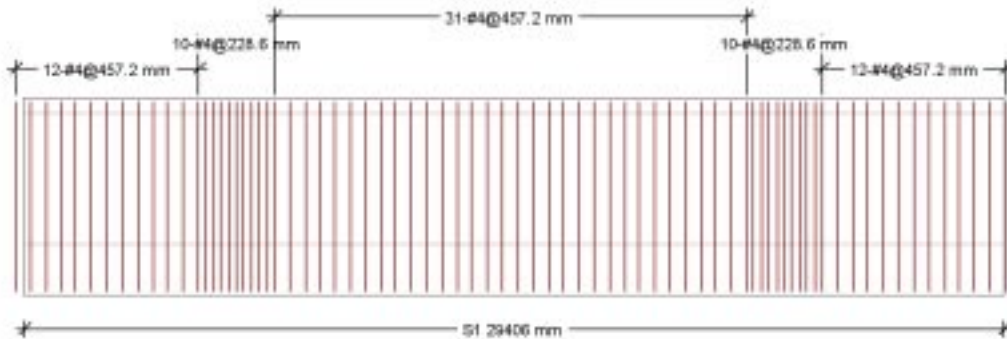


Figure 5-c : Étriers

2.6 Paramètres des poutres de béton armé

La dernière étape consiste à rattacher les configurations d'armatures décrites précédemment aux poutres du modèle.

2.7 Analyse

L'analyse du modèle structurel, le calcul des résistance et le calcul des facteurs de capacité portante peut s'effectuer en une ou plusieurs étapes.

Lorsque la norme pour la résistance des ponts utilisée est la norme S6-2000, la vérification de la résistance des membrures peut se faire selon deux méthodes:

- **Vérification**
Calcul de la résistance selon les recommandations de la norme en regard de la conception d'un nouveau pont (excluant les particularités du chapitre 14). Notez qu'il est alors nécessaire de déterminer les combinaisons de charges selon la méthode habituelle.
- **Évaluation**
Calcul de la résistance selon les recommandations de la norme en regard de la conception complété par les facteurs d'ajustement des charges et des résistances décrits dans le chapitre 14 de la norme S6-2000.

La résistance en flexion des éléments de béton armé est calculée conformément à l'article 8.8.3. Les longueurs de développement des armatures longitudinales sont calculées selon l'article 8.15. La

résistance au cisaillement des éléments de béton armé est calculée conformément à l'article 8.9.2 en négligeant les efforts de torsion et les efforts axiaux. La résistance au cisaillement du béton et la contribution des étriers sont calculés selon la méthode simplifiée (Art. 8.9.3.4.2 et 8.9.3.8). La variation de l'espacement des étriers le long d'une ligne de fissure est considérée au besoin.

2.8 Résultats

Les résultats d'analyse disponibles sont très complets. Au nombre de ceux-ci, notons les informations spécifiques à l'évaluation des ponts selon la norme S6-2000 :

- Facteurs de pondérations α_D et α_L des charges de bases utilisés pour les pondérations des efforts dans les membrures et pour les réactions d'appuis.
- Enveloppe des efforts pondérés en fonction du comportement E1, E2 et E3 des éléments analysés. Notez que chacun de ces résultats est disponible pour chaque membrure. Dans le module d'évaluation de la résistance, seulement les valeurs applicables sont utilisées.

Les résultats relatifs au calcul des résistances des éléments de béton armé sont les suivants :

- État limite de flexion
- État limite de cisaillement
- Résumé des états limites

Les résultats relatifs au calcul des facteurs de capacités portantes (FCS) des éléments de béton armé sont les suivants :

- Table des FCS pour la flexion
- Table des FCS pour le cisaillement
- Table du résumé des FCS

Les résultats de flexion et de cisaillement peuvent être présentés sous forme graphique. Les figures 6 et 7 présentent les résultats pour un des éléments du modèle. Ces résultats peuvent être comparés avec ceux de la calculatrice de béton armé pour une section critique donnée. La calculatrice de béton permet d'obtenir de l'information pertinente sur la résistance d'une section critique choisie par l'utilisateur à l'aide de la norme S6-2000.

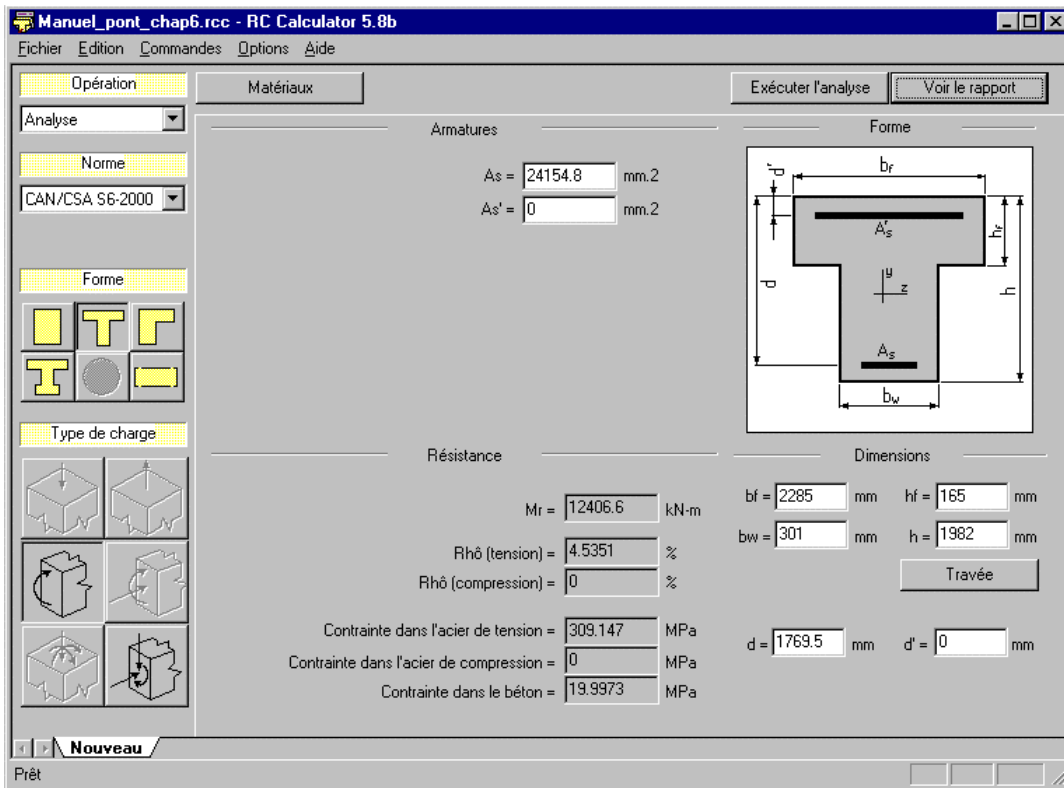
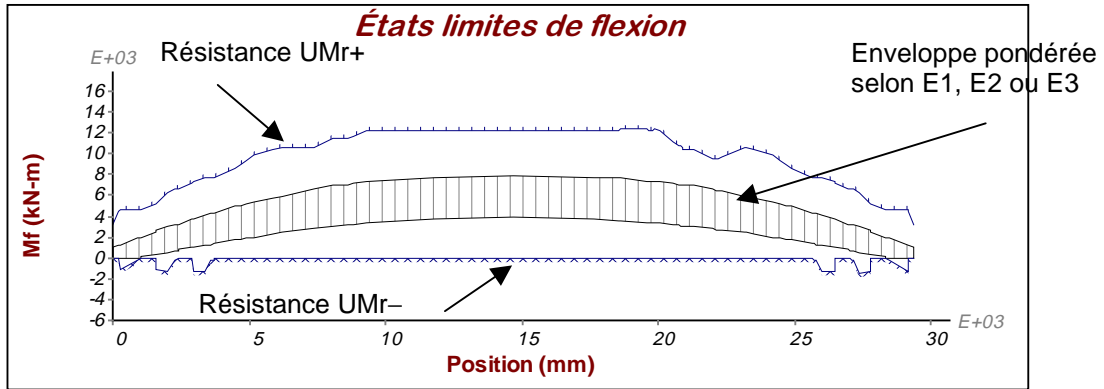


Figure 6 : Enveloppe des efforts pondérés et des résistances en flexion d'une poutre

L'ingénieur peut utiliser la calculatrice de béton armé au cours des travaux d'évaluation de ponts tel qu'illustré à la figure 7. Ainsi, pour la section critique à $x=14703$ mm, la résistance calculée par la calculatrice est de $M_r = 12406.6$ kN-m et la capacité portante calculée lors de l'évaluation est de $UM_r = 12282.6$ kN-m ($U = 0.99$, $M_r = 12406.6$ kN-m).

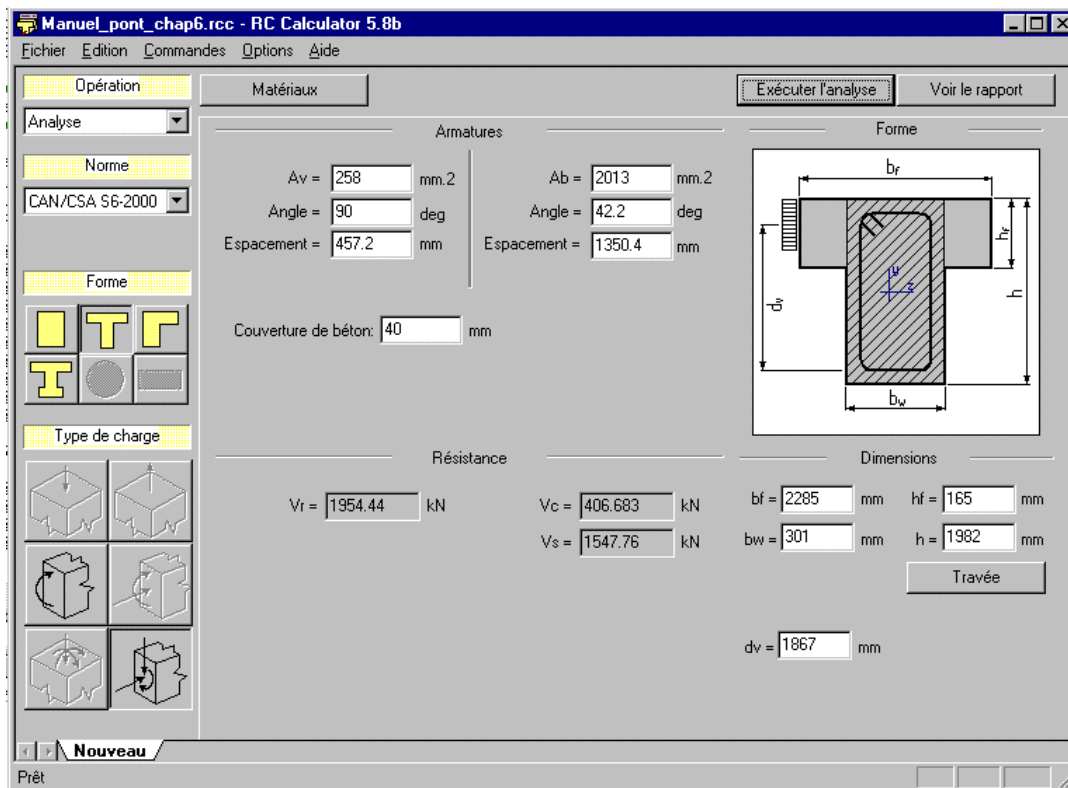
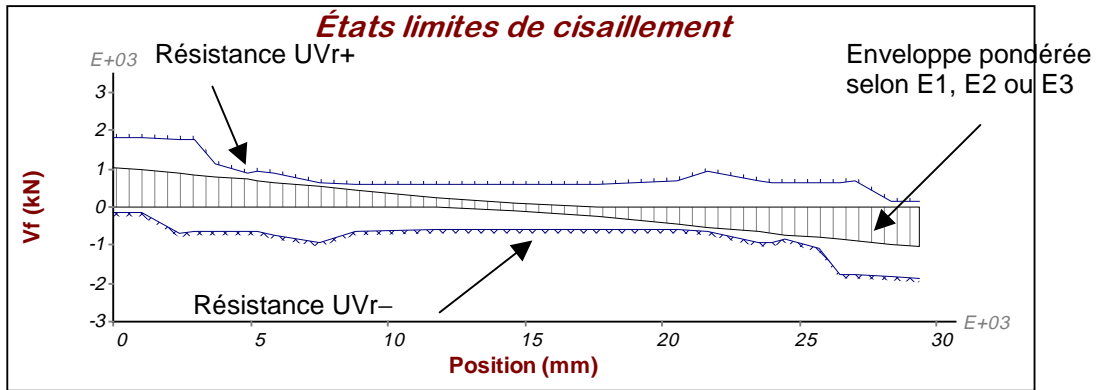


Figure 7 : Enveloppe des efforts pondérés et des résistances au cisaillement d'une poutre

L'ingénieur peut utiliser la calculatrice de béton armé au cours des travaux d'évaluation de ponts tel qu'illustré à la figure 6. Ainsi, pour la section critique à $x=0$, la résistance calculée par la calculatrice est de $V_r = 1954.4$ kN et la capacité portante calculée lors de l'évaluation est de $UV_r = 1837.4$ kN ($U = 0.94$, $V_r = 1954.6$ kN).

La calculatrice de béton armé simplifie aussi le calcul de la capacité portante d'une pièce endommagée.

3. CONCLUSION

Les nouvelles révisions des normes de conceptions de ponts, de charpentes métalliques ou de structures de béton armé apportent des niveaux de complexités de plus en plus élevés auxquels les ingénieurs doivent faire face. La norme de conception et d'évaluation de ponts CAN/CSA S6-2000 en est un exemple

des plus éloquentes. Il devient de plus en plus nécessaire aux ingénieurs de se munir d'outils informatiques adaptés à ces nouvelles réalités.

L'exemple présenté dans cet article relatif à l'évaluation d'une poutre de pont en béton armé selon la norme CAN/CSA S6-2000 illustre la facilité et la rapidité de mise en œuvre de problèmes complexes à l'aide de logiciels spécialisés. De telles technologies accroissent également la productivité des ingénieurs et la qualité des travaux effectués de façon notable en effectuant les calculs répétitifs de manière systématique et rapide. Le temps et l'énergie ainsi épargné peuvent alors être consacré entièrement à la réflexion et la créativité caractéristique du travail de l'ingénieur.

L'exemple démontre aussi l'apport non négligeable que peuvent avoir des outils simples et rapides dans le raffinement des modèles structuraux analysés. Que ce soit pour vérifier l'influence d'une fissure ou de la dégradation d'un élément, pour calculer la résistance d'une poutre à une section critique particulière ou pour déterminer les armatures et les dimensions requises d'une section sous une sollicitation précise, les logiciels complémentaires tels les Calculatrices d'acier, de béton armé et de fondations sont des outils indispensables qu'ils soient utilisés seuls ou conjointement avec des logiciels d'analyses structurales.

RÉFÉRENCES

- Canadian Standards Association (2000), *Canadian Highway Bridge Design Code*, CAN/CSA-S6-00
Ministère des Transport du Québec (2000), *Évaluation de la capacité portante des structures*
SAFI Informatique inc. (2001), *Guide d'utilisation SAFI 5.7 pour Windows 95/98/NT*
SAFI Informatique inc. (2001), *Manuel de références: Pont SAFI 5.7 pour Windows 95/98/NT*
SAFI Informatique inc. (2001), *Manuel de références: RC Calculator pour Windows 95/98/NT*