

~~MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
PLACE HAUTE-VILLE, 24^e ÉTAGE
700 EST, BOUL. ST-CYRILLE
QUÉBEC, QUÉBEC, G1R 5H1~~

UNE APPROCHE PRAGMATIQUE POUR LA
PROGRAMMATION MULTIPÉRIODE, SOUS
CONTRAINTÉ BUDGÉTAIRE DES
PROJETS DE RÉHABILITATION STRUCTURALE

Ministère des Transports
Centre de documentation
930, Chemin Ste-Foy
6^e étage
Québec (Québec)
G1S 4X9

CANQ
TR
776

464 396

UNE APPROCHE PRAGMATIQUE POUR LA PROGRAMMATION
MULTIPÉRIODE, SOUS CONTRAINTE BUDGÉTAIRE, DES
PROJETS DE RÉHABILITATION STRUCTURALE

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
PLACE HAUTE-VILLE, 24^e ÉTAGE
700 EST, B^{oulevard} ST CYRILLE
QUÉBEC, QUÉBEC, G1R 5H1



PAR: PEHLIVANIDIS, Michalis
Ingénieur
Ministère des Transports du Québec

BÉLAND, Mario
Ingénieur
Ministère des Transports du Québec

Ministère des Transports
Centre de documentation
930, Chemin Ste-Foy
6^e étage
Québec (Québec)
G1S 4X9

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
~~200, Rue Dorchester sud, 7^e~~
~~Québec, (Québec)~~
~~G1K 5Z1~~

QTRW
CANQ
TR
776

UNE APPROCHE PRAGMATIQUE POUR LA PROGRAMMATION
MULTIPÉRIODE, SOUS CONTRAINTE BUDGÉTAIRE, DE
PROJETS DE RÉHABILITATION STRUCTURALE

Pehlivanidis, Michalis et Béland, Mario

Le vieillissement progressif du réseau routier implique un accroissement des besoins en réhabilitation structurale. La programmation rationnelle et pragmatique de ces travaux apporterait des bénéfices aux usagers de la route tout comme aux organismes responsables de la conservation du réseau.

Le système de programmation que nous avons élaboré est composé de trois modules: prévision, analyse économique et programmation. Une des limites des méthodes existantes de programmation est le petit nombre de projets qu'elles peuvent convenablement traiter. La méthode que nous proposons n'est pas, en pratique, limitée quant au nombre de projets à considérer simultanément. En outre, des essais de simulation que nous avons effectués indiquent que sa performance se compare bien avec la solution optimale obtenue par des méthodes exactes.

Gestion de pavages, réhabilitation structurale, programmation, heuristique, optimisation, système.

1. Introduction

Le vieillissement progressif du réseau routier laisse entrevoir qu'une partie de plus en plus importante d'investissements dans ce domaine sera dorénavant consacrée à la réhabilitation structurale.

Par "réhabilitation structurale" nous entendons toute intervention sur le réseau qui permet de redonner à la chaussée de la route sa capacité portante de design ainsi que sa qualité de roulement initiale. Ce type d'intervention inclut les divers renforcements de la chaussée, dont les "couches d'usure". Toutefois, elle exclut les interventions à caractère préventif telles que le rapiéçage, le traitement de surface, le scellement de fissures, etc.

La programmation rationnelle des investissements de réhabilitation structurale permettrait d'en retirer les plus grands bénéfices possibles pour l'utilisateur de la route tout en respectant les contraintes budgétaires que la société imposera à cette mission gouvernementale. Selon l'Association des routes et transports du Canada, la programmation rationnelle de projets de réhabilitation structurale doit se faire à deux niveaux:

"Tout d'abord on voit les décisions administratives nécessaires pour établir un programme d'ensemble des projets. Ensuite, on retrouve l'exigence de réaliser chaque projet avec le maximum d'économie".
[1]

Notons que de ces deux niveaux d'analyse on retrouve beaucoup plus le deuxième que le premier. En effet, les programmations régionales ressemblent plus à des inventaires de projets à réaliser sur un horizon donné qu'à des efforts de programmation cohérente tenant compte de l'ensemble du réseau où:

"... le choix des projets spécifiques doit se faire après comparaison de tous les projets possibles toujours à l'intérieur des budgets disponibles et autres contraintes". [2]

2. Une approche pragmatique de budgétisation

Opérationnaliser aussi fidèlement que possible ces orientations du "Guide de gestion routière" implique le développement d'un système pragmatique, capable d'effectuer deux types d'analyse: une économique et une combinatoire.

La première qui porte sur l'évolution des coûts et des bénéfices de chaque projet est pour la plupart assez bien élaborée dans la littérature économique. C'est ainsi qu'on y retrouve des indices de rentabilité tels que le rapport bénéfices-coûts (B/C) ou la valeur présente nette (VPN) d'un projet.

L'analyse combinatoire implique l'énumération de toutes les permutations (quant au temps de réalisation de projets) qui à l'intérieur de l'horizon de programmation respectent les contraintes annuelles sur le budget. Lorsque le nombre de projets à considérer dépasse la douzaine ou la vingtaine, l'analyse combinatoire par énumération complète devient inefficace.

Beenhakker [3] donne l'exemple suivant pour illustrer ce fait. Si on considère la programmation de dix projets à l'intérieur d'un horizon de cinq ans, où les contraintes budgétaires permettent l'assignation de deux projets, au maximum, par période de programmation, alors le nombre total de combinaisons possibles est supérieur à 100 000.

Or, pour résoudre ce problème de budgétisation, des méthodes de programmation mathématique telles que la programmation linéaire et la programmation dynamique ont été proposées à la place de l'analyse combinatoire. Toutefois, l'application de ces méthodes à la programmation des projets de réhabilitation structurale [4], [5], [6], [7], n'est pas sans problème, entre autres pour les raisons suivantes:

Puisque les budgets annuels sont, règle générale, définis par région administrative de voirie il s'ensuit que la programmation, au niveau du réseau, doit se faire sur la même base. Or, dans toute application réaliste à ce niveau le nombre de projets de réhabilitation structurale à considérer simultanément est grand, de l'ordre de 1 000 projets par région. Cet ordre de grandeur rend problématique l'utilisation des méthodes traditionnelles exactes de programmation mathématique. Notons que ce problème se complique lorsqu'on considère que le coût d'un projet de réhabilitation structurale varie d'année en année en fonction de l'état de la chaussée et de la fondation au moment de la réalisation du projet.

Par ailleurs, les subtilités de formulation et d'interprétation des résultats de ces méthodes ne sont que rarement maîtrisées par les non-spécialistes ce qui,

compte tenu du caractère décentralisé de la programmation des projets de réhabilitation structurale, hypothèque en quelque sorte la crédibilité, et partant, l'utilisation généralisée d'un système de programmation qui repose sur ces méthodologies. Par souci de pragmatisme nous avons, donc, opté pour une heuristique qui représente généralement une bonne approximation de la solution optimale.

L'heuristique choisie est inspirée d'un algorithme que Heggie [8], a déjà utilisé avec succès dans le contexte de la programmation multipériode des projets d'expansion du réseau. Cet algorithme a été cependant modifié pour pouvoir tenir compte des coûts de réhabilitation structurale qui varient dans le temps. Mentionnons aussi qu'une variante de cet algorithme a été proposée par Miller [9] également dans le contexte de projets d'expansion du réseau.

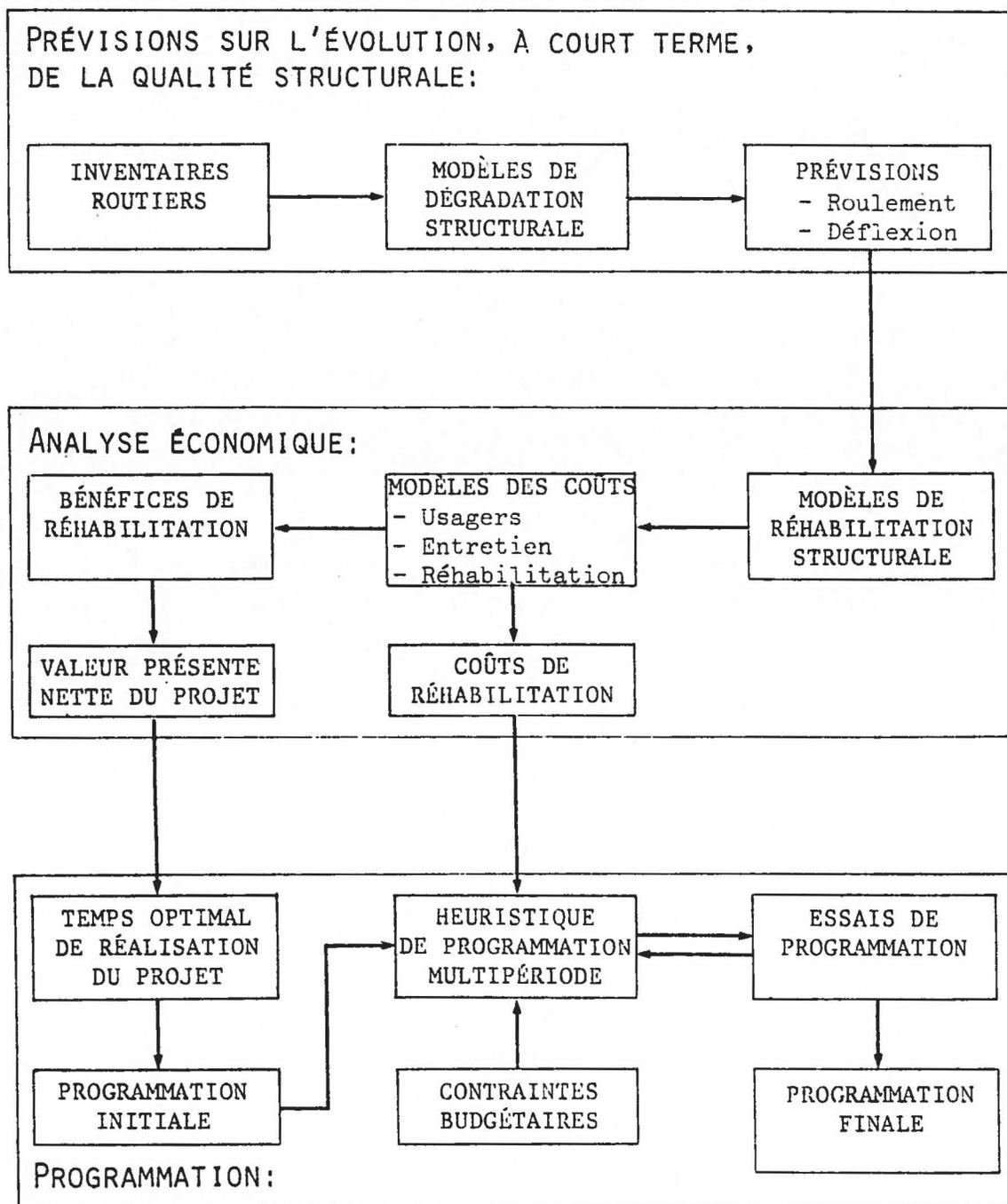
Heggie a comparé les résultats d'application de l'heuristique avec la solution produite par une routine de programmation linéaire. Il a constaté peu de différence entre les assignations produites par les deux méthodes. Il a remarqué, toutefois, que l'heuristique nécessitait un temps d'exécution et d'espace de mémoire moindres que la routine de programmation linéaire.

3. Aperçu global du système de programmation

L'heuristique fait partie intégrante d'un système de programmation de projets de réhabilitation structurale composé essentiellement de trois modules: un module de prévision sur l'évolution à court terme de la qualité structurale, un module d'analyse économique et un module de programmation. La figure 1 présente la structure générale de ce système. Pour une description détaillée du prototype de programmation multipériode on peut consulter Béland et.al. [10].

Au niveau du premier module, les hypothèses les plus simples sur le taux de dégradation structurale ont été retenues. En fait, les modèles de prévision de l'évolution de la qualité de roulement et de la capacité portante de la chaussée existante ne sont que des extrapolations. Elles incorporent, cependant, des éléments connus du comportement de la route tels que l'allure générale de la courbe de dégradation, son plafonnement à une valeur limite, etc.

FIGURE 1:
APERÇU GLOBAL DU PROTOTYPE
DE PROGRAMMATION MULTIPÉRIODE



La fonction principale du module d'analyse économique est le calcul de la valeur présente nette du projet par rapport à son temps de réalisation. Ces informations sont essentielles pour le module de programmation. Pour produire ces informations le module utilise les prévisions sur la qualité structurale de la route, lesquelles sont traitées par des modules de coûts et de bénéfices.

Au coeur du module de programmation se trouve une heuristique qui à partir de données sur la valeur présente nette et les coûts de projets, manipule l'agencement des projets dans le temps dans le but de satisfaire les contraintes budgétaires tout en minimisant la perte globale en valeur présente nette. Au bout d'un nombre fini d'itérations ce module produit la programmation finale, c'est-à-dire une liste qui assigne à chaque projet son année de réalisation dictée par les contraintes budgétaires.

4. Modèles de prévision et d'analyse économique

Evolution de la qualité de roulement

A partir des observations sur le comportement de l'uni de la chaussée il est possible de postuler que le taux de dégradation de la qualité de roulement est proportionnel à sa qualité courante et que ce taux devient nul lorsque la qualité de roulement assume une valeur minimale, x_{\min} . Cela implique que $x = x(t)$ satisfait l'équation différentielle:

$$\frac{dx}{dy} = - \lambda (x - x_{\min})$$

La solution à cette équation dépend des limites d'intégration définies par les deux plus récentes mesures sur la qualité de roulement. Mentionnons également que le modèle assume de plus que lorsque $x(t) = x_{\text{sec}}$, où x_{sec} est la plus petite valeur tolérée de qualité de roulement, alors $x(t) = x_{\text{sec}}$ c'est-à-dire que la qualité de roulement est maintenue par intervention d'entretien (rapiéçage manuel, par exemple) à cette valeur au-delà de laquelle on appréhende des problèmes de sécurité routière.

Evolution de la capacité portante

En pratique la capacité portante d'une chaussée est caractérisée par sa mesure de déflexion à l'essai

Benkelman. Une hypothèse plausible sur l'augmentation moyenne annuelle de la déflexion est que son taux d'augmentation est constant dans le court terme. Cela suggère que, pour des prévisions à court terme, $y = y(t)$ satisfait l'équation différentielle:

$$\frac{dy}{dt} = \text{const.}$$

La solution à cette équation est une fonction linéaire en t . Sa pente dépend des limites d'intégration définies par les deux plus récentes mesures de déflexion (valeur moyenne, plus deux écarts-type).

Modèles de réhabilitation structurale

La réhabilitation structurale remet, par définition, la chaussée à son état de qualité initiale. Cela implique nécessairement qu'elle rehausse le coefficient de roulement à sa valeur maximale possible, x_{max} , et réduit la déflexion à sa valeur de design, y_D . Une autre hypothèse faite dans ce contexte est que l'intervention de réhabilitation est dimensionnée de telle façon que τ années après l'intervention le coefficient de roulement est égal à x_D , une valeur prévue par le design. Ces hypothèses permettent de dériver l'équation du modèle d'évolution de la qualité de roulement après une intervention de réhabilitation structurale.

Il est important de préciser que relativement à l'opération de réhabilitation de la qualité de roulement il est supposé qu'une couche de correction a été tout d'abord appliquée sur la chaussée qui a été ainsi nivelée préalablement à la pose d'une couche de renforcement. Evidemment le coût de la couche de correction croît en fonction de l'état de dégradation de la chaussée au moment de la réhabilitation.

Quant à la réhabilitation de la capacité portante de la route nous avons adopté pour le prototype le modèle de l'Asphalt Institute [11] sur le dimensionnement des renforcements en béton bitumineux en utilisant les données de l'essai au moyen de la poutre Benkelman. Ce modèle, qui est similaire au modèle de l'ARTC [12], donne compte tenu du trafic lourd et de la période de design envisagée, l'épaisseur de la couche de renforcement requise en fonction de la valeur de la déflexion au moment de l'intervention.

Les coûts aux usagers

Dans le contexte d'un projet de réhabilitation structurale les coûts aux usagers qui présentent un intérêt particulier sont ceux reliés à la qualité de roulement sur la chaussée de la route. Ces coûts sont ici définis en terme de dépenses additionnelles que l'utilisateur doit défrayer à cause d'un état imparfait de la chaussée du point de vue de roulement.

Ces coûts jouent un rôle important dans l'analyse économique et la programmation des projets de réhabilitation structurale car la réduction totale apportée à ces coûts par l'intervention de réhabilitation représente les bénéfices que les usagers de la route reçoivent sur un horizon donné. Plusieurs études dont [13] réalisées récemment par Texas Transportation Institute fournissent des renseignements sur l'ordre de grandeur de ces coûts.

La figure 2 illustre l'approche suivie pour déterminer les bénéfices annuels aux usagers provenant d'une intervention de réhabilitation de la chaussée.

Les coûts d'entretien

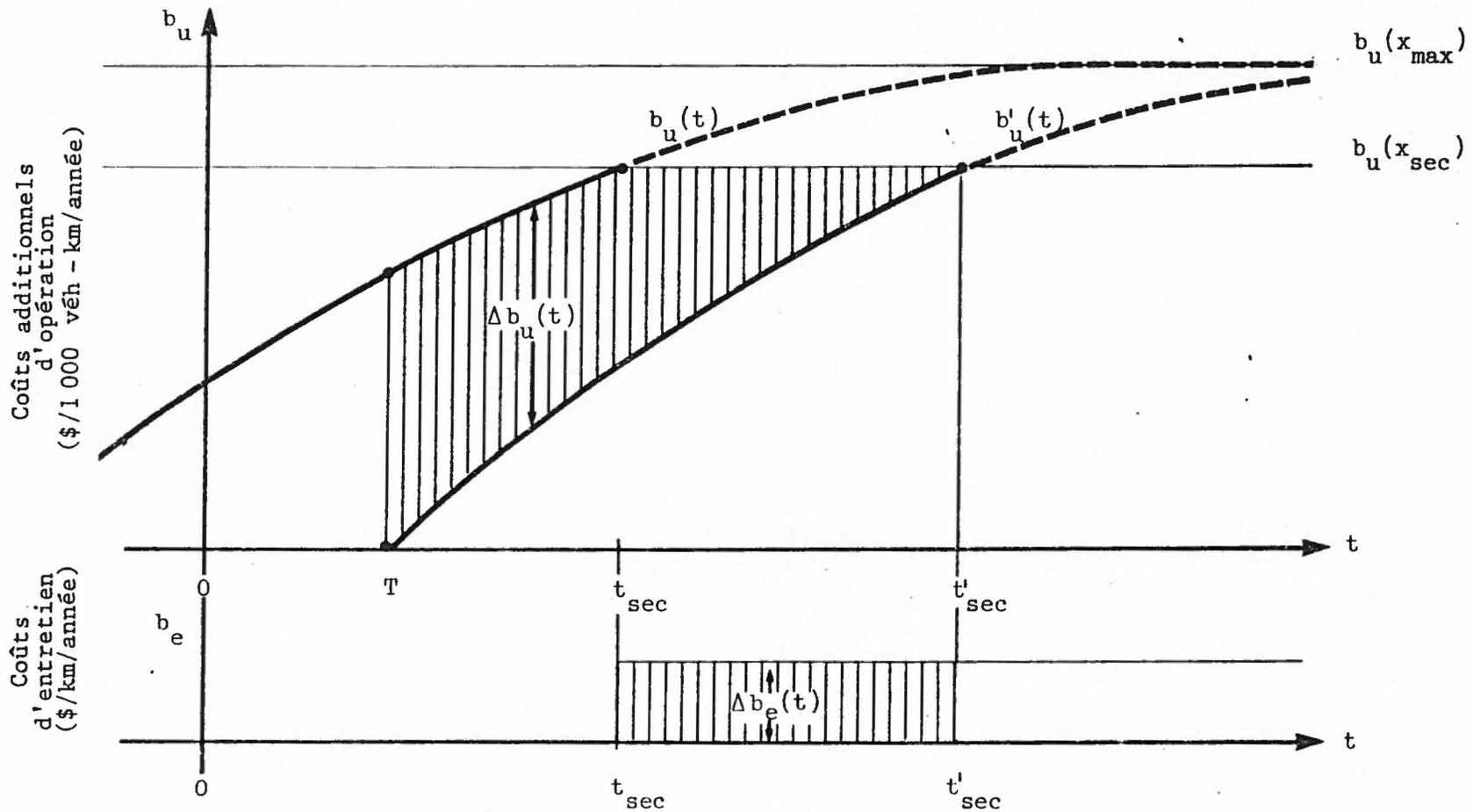
On entend par entretien ici les opérations mineures de rapiéçage manuel, etc. effectuées principalement dans le but d'assurer un niveau minimal de sécurité sur la chaussée d'une route ayant une qualité de roulement médiocre ou mauvaise.

Pour les fins du prototype, nous assumons que lorsque la qualité de roulement, $x(t)$, est inférieure à une qualité cible, x_{sec} , des opérations d'entretien mineur sont automatiquement déclenchées. L'effet de ces opérations est le maintien de la qualité, anuelle moyenne, de la route indéfiniment au niveau de la qualité cible. Les coûts annuels de cette opération sont donnés comme intrants à l'analyse économique et sont fonction de la qualité de roulement cible, x_{sec} , un autre intrant à préciser. Karan et al. [4] présentent des valeurs indicatrices de l'ordre de grandeur des coûts d'entretien.

La figure 2 illustre l'approche utilisée pour déterminer les bénéfices annuels dus à une réduction des coûts d'entretien apportée par l'intervention de la réhabilitation structurale.

FIGURE 2:

DETERMINATION DES BÉNÉFICES ANNUELS ($\Delta b_u(t) + \Delta b_e(t)$)
D'UNE INTERVENTION DE RÉHABILITATION STRUCTURALE



Les coûts de réhabilitation

Dépendant de l'ampleur du besoin, une intervention de réhabilitation peut comprendre: la pose d'une couche de correction et du liant d'accrochage; la pose de la couche de surface et le rechargement des accotements en gravier; finalement, la pose d'un revêtement de mélange ouvert. Le prix total au kilomètre pour chacune de ces opérations varie en fonction du taux de pose, (kg/m²) [14]. Ce dernier pourrait être déterminé à partir de l'épaisseur de la couche de renforcement requise déterminée elle-même par le modèle de réhabilitation structurale.

Temps optimal de réhabilitation

Lorsqu'on dispose de fonds illimités, le meilleur moment, du point de vue économique, pour réaliser un projet quelconque est alors que sa valeur présente nette (VPN) est maximum et positive. Rappelons que la valeur présente nette d'un projet est définie comme la somme des bénéfices actualisés du projet moins son coût de réalisation actualisé aussi.

En se référant à la figure 2, il s'ensuit que la valeur présente nette d'un projet de réhabilitation structurale dont le temps de réalisation est T, est donnée par:

$$VPN(T) = \sum_{t=T}^{t'_{sec}} \frac{\Delta b_u(t)}{(1+r)^t} + \sum_{t=t'_{sec}}^{t'_{sec}} \frac{\Delta b_e(t)}{(1+r)^t} - \frac{C(T)}{(1+r)^T}$$

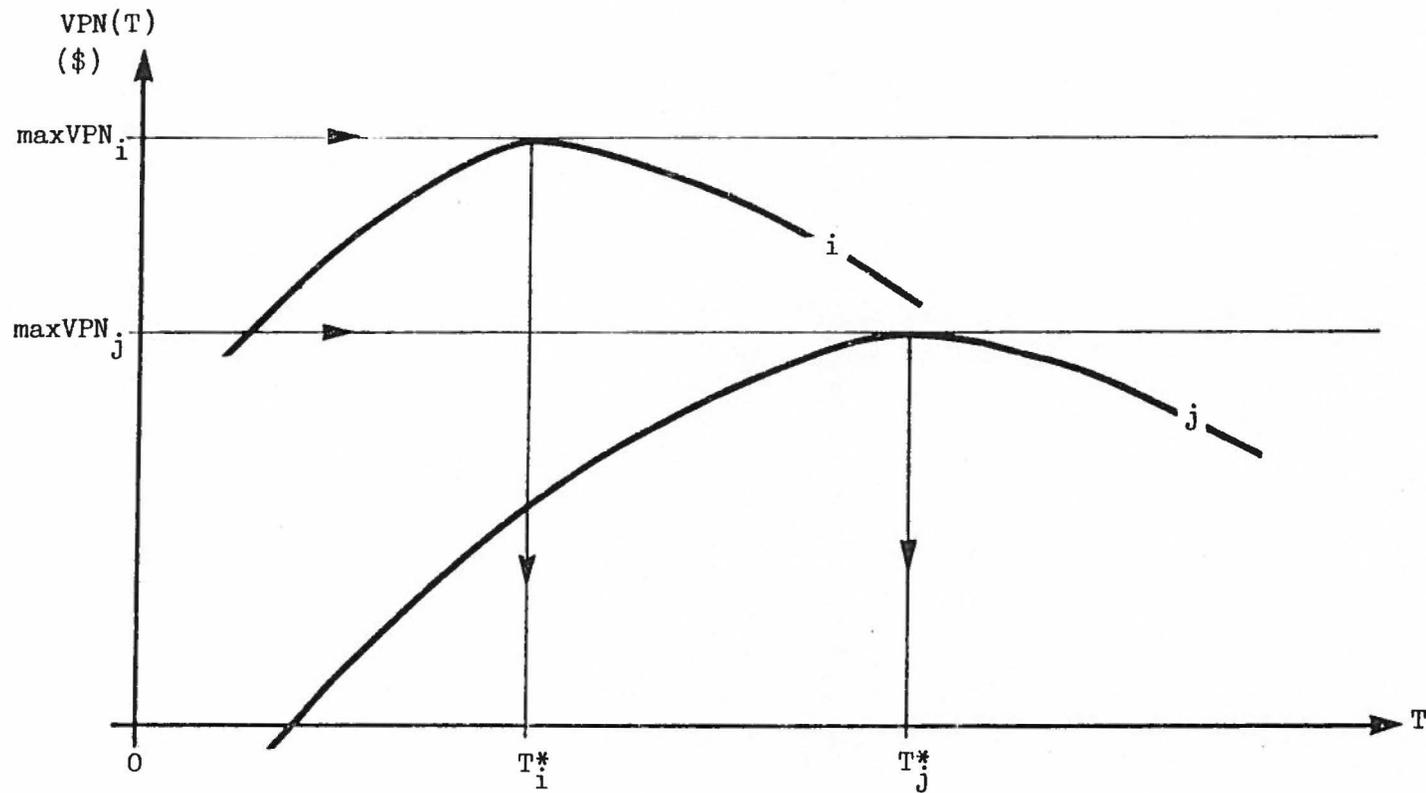
où: $C(T) = C_R(T) + C_S(T)$ est le coût total d'intervention et r le taux d'actualisation.

Nous faisons ici l'hypothèse que les projets de réhabilitation structurale peuvent se compléter à l'intérieur d'une année. Cette hypothèse est raisonnable si l'on considère qu'un tel projet pourrait être morcelé en de sous-projets d'une durée de réalisation inférieure ou égale à un an.

Notons, par ailleurs, que le maximum de l'expression pour la VPN(T) peut facilement se trouver par une simple énumération puisque T est entier et l'horizon de programmation est de l'ordre de 5 à 10 ans. L'année correspondant au maximum de la VPN est l'année optimale de réalisation du projet. La figure 3 illustre ce principe en montrant deux courbes de VPN typiques de projets de réhabilitation structurale.

FIGURE 3:

DÉTERMINATION DU TEMPS OPTIMAL (T^*) DE RÉALISATION
D'UN PROJET DE RÉHABILITATION STRUCTURALE
EN L'ABSENCE DES CONTRAINTES BUDGÉTAIRES



5. Heuristique de programmation multipériode

Lorsque les fonds destinés à la réhabilitation structurale sont limités l'année optimale de réalisation d'un projet de ce type est déterminé par une procédure passablement plus complexe que celle décrite à la section précédente.

La programmation de projets de réhabilitation structurale peut être formulée, en termes de programmation linéaire, comme un problème typique de budgétisation. Elle assume, alors, la formulation:

$$\begin{aligned} \text{Maximiser} \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{T=1}^{T_{\max}} \text{VPN}_i(T) \cdot X_i(T) \\ \text{Sujet aux contraintes} & \sum_{i=1}^n C_i(T) \cdot X_i(T) \leq \text{BB}(T) \\ \text{budgétaires:} & \\ \text{et les} & \\ \text{contraintes} & \sum_{T=1}^{T_{\max}} X_i(T) \leq 1 \quad i=1,2,\dots,n ; T=1,2,\dots,T_{\max} \\ \text{physiques:} & \end{aligned}$$

où:

$$0 \leq X_i(T) \leq 1 \quad \text{pour } T=1,2,\dots,T_{\max} \text{ et } i=1,2,\dots,n$$

$\text{VPN}_i(T)$ est la valeur présente nette du projet i s'il est réalisé au temps T ,

$C_i(T)$ est le coût de réalisation du projet i s'il est réalisé au temps T ,

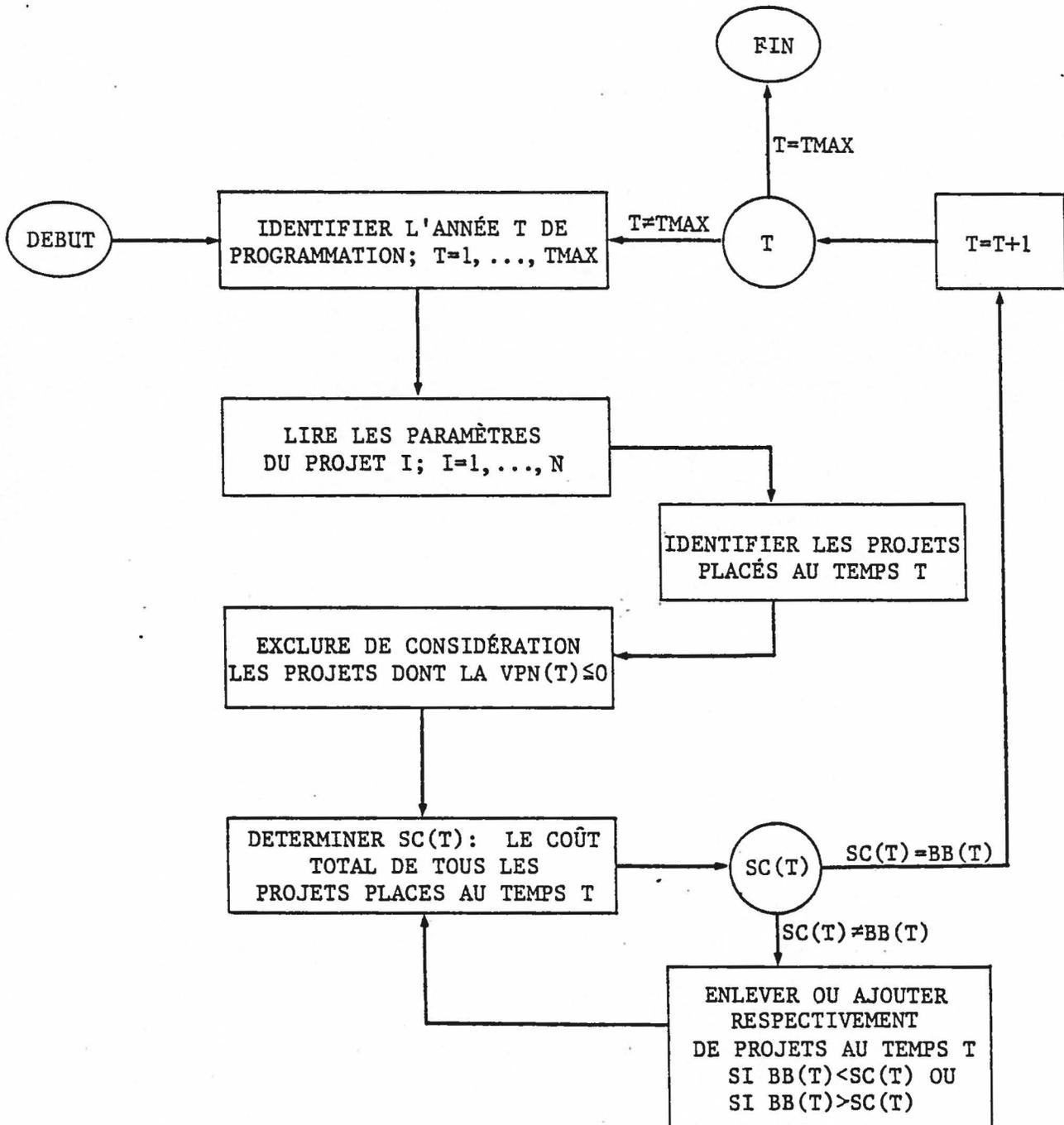
$\text{BB}(T)$ est la contrainte budgétaire au temps T ,

n est le nombre total de projets et

T_{\max} est l'horizon de la programmation.

En présence des contraintes budgétaires et lorsque n , le nombre total de projets est grand il devient, en pratique, impossible de résoudre de façon exacte le problème, ci-haut, de budgétisation [15]. Pour trouver

FIGURE 4:
ÉTAPES LOGIQUES DE L'ALGORITHME
DE LA PROGRAMMATION MULTIPÉRIODE



alors une solution qui se rapproche suffisamment de la solution optimale nous pouvons utiliser une approche heuristique.

La figure 4 présente les étapes logiques impliquées par cette procédure dont le but est de respecter les contraintes budgétaires annuelles en réarrangeant les divers projets dans le temps aussi près que possible à leur temps optimal de réalisation. On obtiendrait ainsi une assignation réalisable des projets par rapport aux budgets de différentes années de programmation qui a, de plus, la plus grande valeur présente nette collective parmi toutes les assignations réalisables possibles. L'algorithme suggéré par cette approche comprend essentiellement les étapes suivantes:

Ayant déterminé, tout d'abord, pour chaque projet son année optimale de réalisation, les projets sont regroupés par année optimale de réalisation et leurs coûts sont totalisés. Ainsi, à chaque année de programmation correspond un coût total découlant de cette première assignation de chaque projet à son année optimale.

En commençant par la première année de l'horizon de la programmation (et répétant la procédure ci-après jusqu'à la dernière année de l'horizon), nous comparons le coût total des projets assignés avec le budget prévu pour l'année en considération.

Si le coût total est supérieur au budget prévu nous choisissons un projet parmi les projets de cette année lequel nous transférons à l'année suivante. Le choix est fait de telle sorte que le projet choisi est celui qui inflige la moindre perte à la valeur présente nette globale lorsqu'il est déplacé en s'éloignant de son année optimale de réalisation. La procédure est répétée jusqu'à ce que le coût total des projets soit plus petit ou égal au budget pour l'année.

Si le coût total est inférieur au budget prévu (et lorsque cette différence dépasse la tolérance désirée) nous choisissons un projet de l'année suivante pour le ramener à l'année considérée. La règle considérée est la même que celle décrite précédemment.

Les assignations et les réassignations des projets à l'année en considération se terminent lorsque le coût total correspondant à cette année est égal au budget prévu (plus ou moins un petit montant représentant un déficit ou un surplus budgétaire tolérable).

La sélection du projet à avancer ou à reculer pour satisfaire aux contraintes budgétaires est régie par le critère décisionnel encadré dans l'algorithme de la programmation multipériode. En voici quelques-uns de ces critères:

- H₀: Minimiser la perte (maximiser le gain) absolue en valeur présente nette;
- H₁: Minimiser la perte (maximiser le gain) en valeur présente nette par dollar investi;
- H₂: Même que H₁ en donnant, en plus, la priorité aux projets ayant une forte valeur présente nette;
- H₃: Même que H₂ en excluant cependant de considération les projets ayant une valeur présente nette négative à une ou plusieurs années à l'intérieur de l'horizon de programmation.

6. Exemple

Le fonctionnement de l'algorithme est illustré ci-après en utilisant les données (valeur présente nette et coût de réhabilitation) de dix projets-témoins. L'horizon de programmation est de cinq ans, le budget annuel est de 100 000 \$ et la tolérance budgétaire est de 10 000 \$.

Le critère décisionnel utilisé est H₀, c'est-à-dire la différence entre la valeur présente nette du projet au temps $T + 1$ et la valeur présente nette du même projet au temps T . La figure 4 et les tableaux 1 et 2 permettent de suivre les étapes logiques de programmation par l'heuristique multipériode.

Dès la première itération de l'algorithme les dix projets se trouvent assignés à leur année optimale de réalisation, cela implique que les projets 5, 6 et 9 sont positionnés à la première année de l'horizon de la programmation.

Puisque le coût total de ces projets, soit 171 561 \$, excède le budget annuel plus la tolérance budgétaire, soit 110 000 \$, l'algorithme choisi un de ces trois

TABLEAU 1

INTRANTS A L'EXEMPLE D'APPLICATION DE L'HEURISTIQUE
DE PROGRAMMATION MULTIPERIODE

PROJET	COUT DE RÉHABILITATION				
	T = 1	T = 2	T = 3	T = 4	T = 5
C (1, T)	44 704	45 384	46 000	46 346	46 346
C (2, T)	43 900	44 996	46 033	46 737	47 635
C (3, T)	46 786	50 148	53 451	57 325	59 818
C (4, T)	21 892	22 348	26 990	33 093	36 477
C (5, T)	41 196	52 515	58 530	65 362	70 029
C (6, T)	60 989	72 390	77 999	83 166	89 586
C (7, T)	26 971	30 811	34 508	38 606	41 480
C (8, T)	45 064	47 599	50 710	52 594	53 914
C (9, T)	69 380	73 085	77 927	82 725	86 984
C (10, T)	55 589	59 718	63 715	68 908	71 192

TABLEAU 1INTRANTS A L'EXEMPLE D'APPLICATION DE L'HEURISTIQUE
DE PROGRAMMATION MULTIPÉRIODE

PROJET	VALEUR PRÉSENTE NETTE				
	T = 1	T = 2	T = 3	T = 4	T = 5
VPN (1, T)	54 757	57 486	58 404	57 875	55 964
VPN (2, T)	3 659	4 079	4 133	3 602	3 118
VPN (3, T)	34 478	42 744	48 527	51 814	52 892
VPN (4, T)	101 693	109 009	108 658	104 770	98 346
VPN (5, T)	41 636	32 387	24 109	18 647	14 076
VPN (6, T)	84 715	79 545	72 462	66 011	60 020
VPN (7, T)	35 035	43 230	49 084	51 895	51 945
VPN (8, T)	-3 252	- 246	1 339	1 606	1 123
VPN (9, T)	46 281	42 185	37 283	32 500	28 657
VPN (10, T)	57 076	59 215	59 525	57 223	53 021

TABLEAU 2

EXEMPLE D'APPLICATION DE L'ALGORITHME
POUR LA PROGRAMMATION MULTIPÉRIODE
 (BBT = 100 000 \$ 10 000 \$)

ANNÉE DE PROGRAM.	ITÉRATION	ANNÉE DE RÉHABILITATION										COUT TOTAL	SVPN
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	1	3	3	5	2	1	1	5	4	1	3	171 561	510 145
1	2	3	3	5	2	1	1	5	4	2	3	102 183	506 049
2	3	3	3	5	2	1	1	5	4	2	3	95 794	506 049
3	4	3	3	5	2	1	1	5	4	2	3	115 747	506 049
3	5	4	3	5	2	1	1	5	4	2	3	109 747	505 520
4	6	4	3	5	2	1	1	5	4	2	3	98 608	505 520
5	7	4	3	5	2	1	1	5	4	2	3	101 295	505 520

projets pour le reporter à l'année suivante. Conformément au critère décisionnel en vigueur, le projet numéro 9 est choisi car son avancement d'un an prive la valeur présente nette globale (510 145 \$) de seulement 4 096 \$ (comparativement à 9 249 \$ pour le projet 5 et 5 170 \$ pour le projet 6.

La deuxième itération ayant assigné le projet 9 à l'année deux de programmation, recalcule le coût total de projets demeurant à l'année un. Ce coût se situe alors à 102 183 \$, et satisfait donc les contraintes. Le coût total de projets assignés à l'année deux sera par la suite comparé aux contraintes budgétaires, etc.

La programmation finale de dix projets est donnée à la septième itération de l'algorithme. A ce point, la valeur globale nette du projet a subi une perte cumulative de 4 625 \$ dont 4 096 \$ dus au report du projet 9 de l'année 1 à l'année 2 et 529 \$ dus au report du projet 1 de l'année 3 à l'année 4 de la programmation.

7. Evaluation et conclusions

Dans le cadre d'une étude exploratoire [16], nous avons effectué un nombre de comparaisons entre les résultats de l'heuristique et ceux obtenus par une formulation en termes de programmation linéaire (P.L.). Le réseau (563 projets potentiels) d'une région administrative de voirie a servi de base à ces comparaisons dont le but est d'apprécier la performance et la pertinence de l'heuristique en tant que méthode de programmation multipériode.

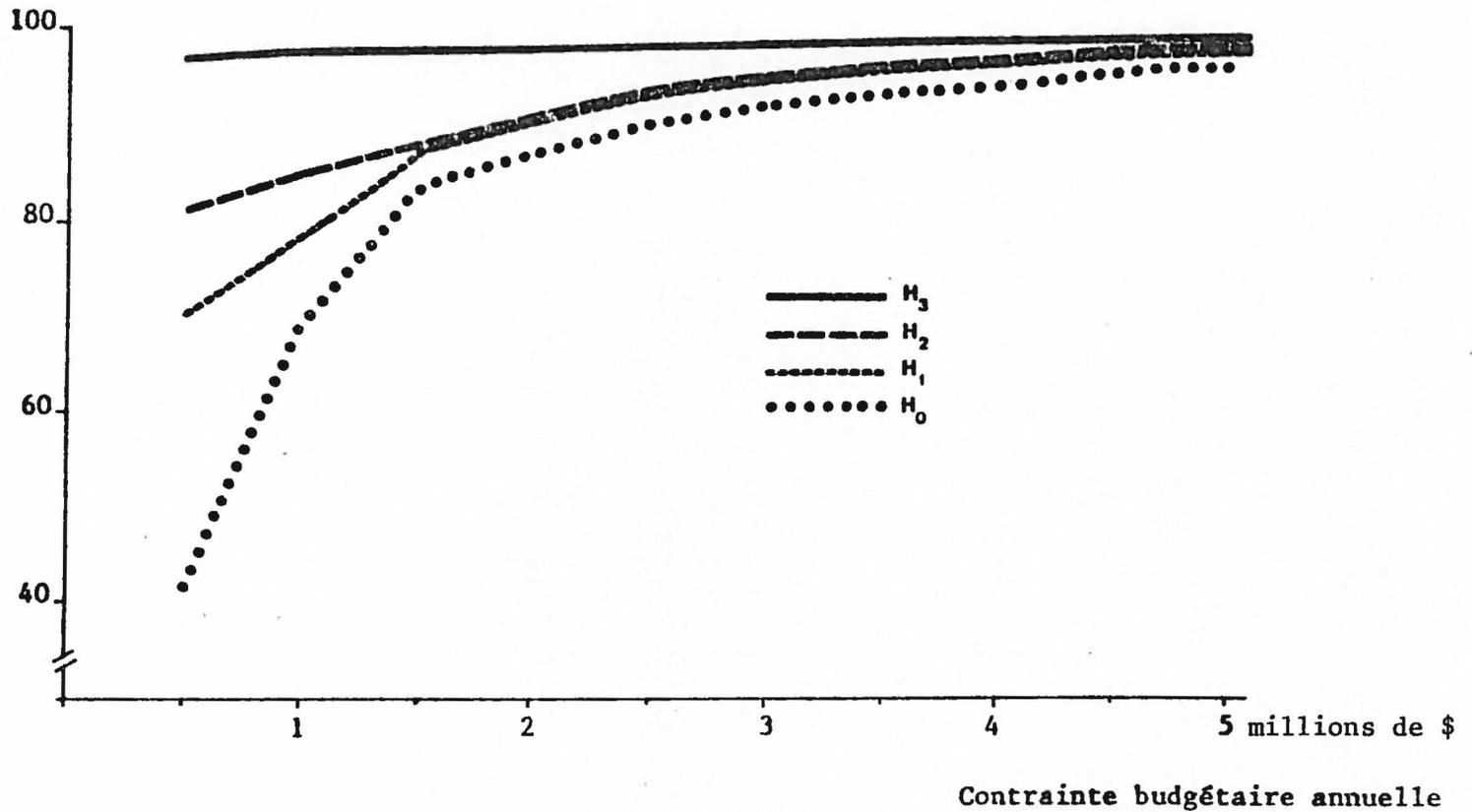
L'évaluation entre les deux approches de programmation a été axée sur trois critères de comparaison: la valeur présente nette pour l'ensemble de projets choisis à l'intérieur de l'horizon de la programmation, le nombre de projets choisis en commun par l'une et par l'autre des méthodes de programmation et le type de projets choisis par chaque approche.

La comparaison a été répétée pour chacun des quatre critères décisionnels à trois niveaux de contraintes budgétaires, soit 0,5 M\$, 2,5 M\$ et 5,0 M\$ par année. MPSX est la routine informatique utilisée pour obtenir la solution optimale par programmation linéaire.

FIGURE 5:

COMPARAISON ENTRE LA PERFORMANCE DE L'HEURISTIQUE MULTIPERIODE
ET LA SOLUTION OPTIMALE PAR PROGRAMMATION LINEAIRE

SVPN de l'heuristique en %
de la SVPN optimale (NPSI)



Une première constatation qui se dégage des comparaisons effectuées concerne le degré d'approximation entre la valeur présente nette collective obtenue par l'heuristique et la valeur présente nette maximale par programmation linéaire. En fait, ce degré varie en fonction de la contrainte budgétaire et du critère décisionnel utilisé, tel qu'illustré à la figure 5.

L'approximation obtenue pour des niveaux de financement réalistes est, en général, supérieure à 90% de la valeur optimale et devrait être considérée satisfaisante. Des niveaux de financement variant entre 2,0 et 3,0 M\$ par année sont considérés réalistes correspondant à des coûts unitaires annuels de réhabilitation de l'ordre de 4 000\$/km/année.

La meilleure performance de l'heuristique est atteinte lorsque nous utilisons le critère décisionnel H_3 . Rappelons que ce critère déplace prioritairement les projets ayant à la fois une petite valeur présente nette et une faible perte de valeur présente nette par \$ investi. De plus, les projets potentiels ayant une valeur présente nette négative sont exclus à priori de considération.

La petite différence entre cette approche et la solution optimale est due au fait que la programmation linéaire est en mesure de satisfaire exactement les contraintes budgétaires en répartissant un certain nombre de projets choisis sur deux ans. A l'encontre, l'heuristique multi-période, par sa structure, assure l'intégralité de projets choisis pour programmation.

Le haut degré d'approximation obtenu sur le plan de la fonction objective repose, comme on peut le constater au tableau 3, sur un choix très similaire de projets inclus dans la programmation par l'une ou l'autre des méthodes. Le nombre de projets choisis en commun par l'heuristique et la P.L. dépend du niveau de financement et du critère décisionnel utilisé.

On peut constater que pour des niveaux de financement réalistes (aux alentours de 2,5 M\$ par année) entre 70% et 90% des projets choisis par l'heuristique ont été également choisis par la programmation linéaire. Cela indique que les critères décisionnels, et en particulier le critère décisionnel H_3 , simulent d'une façon relativement fidèle le processus de choix résultant de la programmation linéaire.

TABLEAU 3

NOMBRE DE PROJETS CHOISIS EN COMMUN PAR L'HEURISTIQUE ET MPSX
EN FONCTION DE LA CONTRAINTE BUDGETAIRE

BUDGET HEURISTIQUE	500 000 \$			2 500 000 \$			5 000 000 \$		
	NO. DE PROJETS CHOISIS PAR L'HEURISTIQUE	PROJETS CHOISIS PAR L'HEURISTIQUE ET MPSX		NO. DE PROJETS CHOISIS PAR L'HEURISTIQUE	PROJETS CHOISIS PAR L'HEURISTIQUE ET MPSX		NO. DE PROJETS CHOISIS PAR L'HEURISTIQUE	PROJETS CHOISIS PAR L'HEURISTIQUE ET MPSX	
		NO.	%		NO.	%		NO.	%
H ₀	15	4	27	96	67	70	234	213	91
H ₁	16	9	56	124	99	80	260	238	92
H ₂	17	12	71	122	97	80	261	240	92
H ₃	20	18	90	131	115	88	267	252	94
MPSX	24			127			280		

Les caractéristiques moyennes des projets choisis par l'une et par l'autre des méthodes de programmation varient en fonction du niveau de financement (tableau 4). Il semblerait, cependant, que sauf marginalement, les projets "prioritaires" (ceux choisis à des niveaux de financement inférieurs) sont maintenus dans la programmation lorsqu'on relâxe les contraintes budgétaires.

Les projets choisis par la routine de programmation linéaire sont, avant tout, caractérisés par leur déflexion moyenne significativement moins forte que celle des projets choisis par l'heuristique. Cette déflexion est également plus faible que celle des projets sur l'ensemble du réseau indiquant ainsi une tendance de la programmation linéaire de choisir des projets ayant une bonne capacité portante. Cette tendance est jumelée par une préférence envers les projets ayant une circulation de véhicules lourds significativement plus forte que celle, en moyenne, sur l'ensemble du réseau.

Le coût moyen des projets choisis par la P.L. est inférieur au coût moyen des projets choisis par l'heuristique. Cela reflète des correctifs moins lourds favorisés par le choix de la programmation linéaire. Fait intéressant à noter que la valeur présente nette (VPN) des projets choisis par la P.L. est en moyenne plus faible que pour les projets choisis par l'heuristique. Leurs VPNS par dollar investi sont, cependant, comparables.

Sur un autre plan, celui de la qualité de roulement, nous remarquons que bien que les deux approches semblent choisir des projets en mauvais état de roulement, l'heuristique favorise davantage les projets ayant la tendance de perdre rapidement leur qualité de roulement. La P.L. semble moins sensible au taux de dégradation de la qualité de roulement. Quant au taux d'augmentation de la déflexion, nous constatons que pendant que les projets ayant une augmentation supérieure à la moyenne sont choisis par l'heuristique, en général, il en est le contraire pour les projets choisis par la programmation linéaire. Il semblerait, donc, que l'heuristique est plus susceptible que la P.L. à inclure dans la programmation des projets "urgents".

Les premières expériences avec l'approche de programmation multipériode sous contrainte budgétaire indiquent qu'en plus d'approximer bien la solution optimale et d'accorder la priorité aux projets considérés généralement urgents, l'approche proposée nécessite un temps

TABLEAU 4

STATISTIQUES SUR LES CARACTÉRISTIQUES MOYENNES DES PROJETS CHOISIS
PAR L'HEURISTIQUE ET PAR LA PROGRAMMATION LINÉAIRE EN FONCTION DU NIVEAU DE FINANCEMENT ANNUEL

CARACTÉRISTIQUES	CRITÈRE DÉCISIONNEL				MPSX	ENSEMBLE DE PROJETS SUR LE RÉSEAU
	H ₀	H ₁	H ₂	H ₃		
<u>Qualité de roulement</u>						
0,5 M\$	45,17	46,29	46,02	45,99	46,01	49,60 à 49,71
2,5 M\$	45,72	45,56	45,56	45,07	45,98	
5,0 M\$	45,77	47,80	45,85	45,86	46,20	
<u>Déflexion (y + 2)</u>						
0,5 M\$	1 689	1 338	1 176	889	797	1 163 à 1 426
2,5 M\$	1 162	1 044	1 045	959	916	
5,0 M\$	1 127	1 095	1 095	1 057	1 041	
<u>Véhicules lourds/ voie/jour</u>						
0,5 M\$	296	517	580	631	584	133 à 139
2,5 M\$	168	165	164	164	159	
5,0 M\$	188	184	183	182	179	
<u>Taux de dégradation de roulement</u>						
0,5 M\$	170	153	141	149	141	156
2,5 M\$	168	165	164	164	159	
5,0 M\$	154	157	156	154	149	
<u>Taux de dégradation structurale (microm/année)</u>						
0,5 M\$	86	66	56	39	32	53
2,5 M\$	55	46	47	42	40	
5,0 M\$	50	49	49	46	44	

TABLEAU 4

STATISTIQUES SUR LES CARACTÉRISTIQUES MOYENNES DES PROJETS CHOISIS
 PAR L'HEURISTIQUE ET PAR LA PROGRAMMATION LINÉAIRE EN FONCTION DU NIVEAU DE FINANCEMENT ANNUEL

CARACTÉRISTIQUES	CRITÈRE DÉCISIONNEL				MPSX	ENSEMBLE DE PROJETS SUR LE RÉSEAU
	H ₀	H ₁	H ₂	H ₃		
<u>Valeur présente nette</u>						
0,5 M\$	886 962	1 426 040	1 551 905	1 582 446	1 354 951	145 843 à 106 932
2,5 M\$	632 624	510 975	517 821	509 255	496 141	
5,0 M\$	349 772	320 402	319 898	315 496	301 282	
<u>Coût de réhabilitation</u>						
0,5 M\$	167 253	155 189	142 888	126 996	104 685	103 774 à 137 937
2,5 M\$	130 807	101 933	103 219	95 734	85 822	
5,0 M\$	106 935	96 800	96 791	93 884	80 496	
<u>Épaisseur</u> (pouces de BB)						
0,5 M\$	4,77	4,53	4,38	3,93	3,41	3,03 à 3,94
2,5 M\$	3,91	3,32	3,34	3,16	2,99	
5,0 M\$	3,35	3,13	3,13	3,03	2,96	

d'exécution raisonnable même pour des situations impliquant un nombre relativement important de projets à programmer (tableau 5). A noter que le temps moyen d'exécution par projet a la tendance de plafonner lorsque le nombre de projets accroît.

A la lumière des résultats encourageants, nous pouvons conclure sur le pragmatisme de l'approche proposée, c'est-à-dire, d'après le Petit Robert, sa susceptibilité d'applications pratiques.

TABLEAU 5TEMPS DE CALCUL EN FONCTION DU NOMBRE DE PROJETS

NOMBRE DE PROJETS	TEMPS TOTAL D'EXÉCUTION	TEMPS MOYEN D'EXÉCUTION
100	1 sec	0,101 sec/projet
250	4 sec	0,016 sec/projet
570	12 sec	0,021 sec/projet
3 000	151 sec	0,050 sec/projet
7 000	471 sec	0,067 sec/projet

RÉFÉRENCES

- [1] Association des routes et transports du Canada, "Guide de gestion routière", Ottawa, 1977, p. 38.
- [2] Ibid., p. 36.
- [3] Beenhakker, Henri L., "Approaches to Dynamic Transport Planning", Transportation vol. 2, no. 3, October 1973, pp. 262-281.
- [4] Karan M.A., Ralph Haas, W.K. Smeaton and Alan Cheetham, "A System for Priority Programming of Investments for Road Network Improvements", Report on OJTCRP Project W-39 (Phase 2), May 1979.
- [5] Phillips D.T., Ch.V. Shanmugham, Sh. Sataye and Robert L. Lytton, "Rehabilitation and Maintenance System District Time Optimization" (RAMS-DTO-1), Texas Transportation Institute Research Report Number 239-3, September 1980.
- [6] Way George B., John F. Eisenberg and J.P. Delton, "Arizona's Pavement Management System", Final Report, Arizona Department of Transportation, January 1982.
- [7] Watanatada Th. and Clell Haral, "Determination of Economically Balanced Highway Expenditure Programs under Budget Constraints: A Practical Approach", in Proceedings of the World Conference on Transport Research, Vol. 3, London 14-17 April 1980, pp. 2117-2137.
- [8] Heggie, Ian G., "Transport Engineering Economics", McGraw Hill, London, 1972, pp. 147-168.
- [9] Miller, Edward, "Scheduling of Highway Improvements", Highway Research Record no. 394, Washington D.C., 1972, p. 18.
- [10] Béland, M., Y. Lessard et M. Pehlivanidis, "Prototype d'un système informatique pour la programmation multi-période de projets de réhabilitation structurale", ministère des Transports du Québec, février 1984.
- [11] The Asphalt Institute, "Asphalt Overlays and Pavement Rehabilitation", Manual Series no. 17, November 1977, chapitres III et IV, pp. 9-48. (cf. en particulier section 4.12 et figure IV-3 pp. 40-41).

MINISTERE DES TRANSPORTS



QTR A 101 942