

OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE DES OUVRAGES À L'AIDE D'UNE APPROCHE GLOBALE EN RÉSEAU

André ORCESI

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)

Christian CREMONA

MEEDDAT - CGDD

1. INTRODUCTION

Cet article présente une procédure d'optimisation du calendrier de maintenance d'un réseau d'ouvrages d'art dans le cadre d'une approche probabiliste. Les systèmes de gestion d'ouvrages actuels s'appuient généralement sur l'état structural des ouvrages pour assurer le non franchissement d'un seuil minimal de sécurité. De ce fait, les conséquences d'une perte de niveau de service pour les usagers en cas de maintenance ou de défaillance des ouvrages ne peuvent pas être prises en compte de manière satisfaisante. Par ailleurs, l'évaluation probabiliste de la performance des ouvrages nécessite généralement d'avoir une bonne connaissance de la géométrie de l'ouvrage, des différents matériaux le constituant et des incertitudes sur toutes les variables mises en jeu, ce qui n'est pas forcément évident pour un gestionnaire d'un réseau d'ouvrages d'art. Ses attentes sont plutôt d'avoir accès à des outils et des méthodologies suffisamment générales pour être utilisées à l'échelle du réseau d'ouvrages, tout en restant suffisamment précises pour tenir compte des spécificités de chaque ouvrage lors du processus de décision. Pour surmonter ces limites, une approche équilibrant les coûts de la demande de transport avec ceux à la charge des gestionnaires est proposée. La performance des ouvrages est caractérisée à l'aide d'une approche non paramétrique utilisant les chaînes de Markov et la notation IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) établie pour chaque ouvrage lors des visites d'inspection. Une procédure d'optimisation sous contraintes, utilisant les algorithmes génétiques, est proposée. Cette technique permet de mener soit un calcul mono-objectif minimisant la somme des coûts de maintenance du gestionnaire et les coûts aux usagers, soit un calcul multi-objectifs minimisant de manière séparée et conflictuelle les coûts du gestionnaire et des usagers. La méthodologie est illustrée à l'aide de l'exemple d'une portion du réseau national français pour lequel les calendriers de maintenance sont déterminés pour chaque ouvrage.

2. MODÉLISATION DE LA PERFORMANCE DES OUVRAGES À L'AIDE DE CHAINES DE MARKOV

2.1. Utilisation de la base de données IQOA

L'accès aux lois individuelles de vieillissement des ouvrages n'est pas systématique pour le gestionnaire des ouvrages. L'approche présentée dans cette étude consiste à contourner ce problème en ne caractérisant la performance des ouvrages que par la probabilité avec laquelle ils vont passer d'un état à un autre au cours du temps, sans présupposer d'un modèle de dégradation a priori. Ce passage est appliqué au système de notation IQOA utilisé en France depuis 1994 et est modélisé de façon matricielle à l'aide du concept mathématique probabiliste des chaînes de Markov (Orcesi, 2007, 2009).

Les campagnes IQOA (IQOA, 1996) concernent les ouvrages de franchissement national d'une longueur supérieure à 2m qui peuvent être des ponts en maçonnerie, en béton armé, en béton précontraint, en métal ou mixte. Le principe d'IQOA est d'attribuer des notes aux ponts suivant l'état dans lequel ils se trouvent. Il existe 5 notes possibles : 1, 2, 2E, 3, 3U (Tableau 1). La Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) a fixé des objectifs sur l'image du patrimoine des ouvrages d'art du réseau routier national qui s'expriment par le respect de valeurs cibles d'indicateurs de qualité (Tableau 2). L'utilisation d'indicateurs de performance,

basés sur ceux utilisés par la Direction des Routes, est proposée dans cette étude. L'objectif n'est pas de contrôler le pourcentage en surface des ouvrages comme le fait la DGITM, mais de contrôler la probabilité d'un ouvrage de se trouver dans une classe IQOA au cours du temps. Ce choix d'indicateurs cibles comme contraintes sur la performance des ouvrages apparaît particulièrement pertinent dans l'objectif d'avoir un modèle en phase avec les attentes d'un gestionnaire d'ouvrages.

Tableau 1. Définition des classes IQOA

État	Signification
1	Ouvrage en bon état apparent relevant de l'entretien courant au sens de l'Instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art.
2	Ouvrage dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé sans caractère d'urgence.
2E	Ouvrage dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé urgent, pour prévenir le développement rapide de désordres dans la structure et son classement ultérieur en 3.
3	Ouvrage dont la structure est altérée et qui nécessite des travaux de réparation mais sans caractère d'urgence.
3U	Ouvrage dont la structure est gravement altérée, et qui nécessite des travaux de réparation urgents liés à l'insuffisance de la capacité portante de l'ouvrage ou à la rapidité d'évolution des désordres pouvant y conduire à brève échéance.

Tableau 2. Indicateurs de gestion

Indice	Définition
$I_3 = 1 + 2$	Indice d'entretien courant du patrimoine (IEC)
$I_4 = 2E$	Indice d'entretien spécialisé du patrimoine (IES)
$I_5 = 3 + 3U$	Indice d'entretien et de réparation du patrimoine (IER)
$I_6 = 3U$	Indice de réparation urgente du patrimoine (IRU)

2.2. Hypothèse de Markoviannité

L'objectif est ici d'évaluer la probabilité pour un ouvrage d'être dans chacun des états IQOA sur une période donnée. L'approche par chaînes de Markov offre un cadre d'analyse adapté à ce problème. L'hypothèse de markoviannité consiste à énoncer que la probabilité pour un ouvrage d'être dans un état donné à la campagne n ne dépend que de l'état dans lequel il était à la campagne $n-1$ et non des campagnes antérieures. Dans ce modèle, seul l'état présent compte pour déterminer les états futurs. Cette hypothèse se justifie par la nature même du patrimoine évalué par les enquêtes IQOA. Les différentes classes de cotation regroupent des réalités très différentes. Il existe surtout une différence de niveau entre les classes 2 et 2E et les classes 3 et 3U. Il est rappelé que les deux premières notes font souvent référence à des exigences d'aptitude au service qui sont en majorité des défauts d'équipements. Les deux dernières font plus référence à des défauts de structure du tablier du pont. L'état futur d'un ouvrage classé en 3 va dépendre davantage de ses défaillances actuelles que des défauts d'équipements signalés dans le passé. C'est donc le présent de l'ouvrage qui est pris en compte pour déterminer son état futur. L'hypothèse d'homogénéité signifie que les probabilités de passage d'un état à un autre ne dépendent pas du temps. Les probabilités de passage d'une classe à une autre sont donc les mêmes quel que soit l'instant d'observation. Cette hypothèse d'homogénéité est supposée justifiée dans le cas du patrimoine IQOA qui constitue un ensemble relativement homogène du point de vue des méthodes de construction mises en place ces dernières années et du vieillissement global qui est assez homogène pour les différentes classes d'ouvrages, la maintenance étant appliquée de la même façon sur les différents ouvrages du réseau routier national. La probabilité de passage d'un état q_1 à q_2 entre l'année i et l'année $i+1$ est alors calculé de manière statistique en utilisant la base de données LAGORA qui regroupe les notes IQOA des ouvrages depuis 1996 :

$$P_x(q_1, q_2) = \frac{\sum_{i=a_0}^{a_f-1} \left(\sum_{k=1}^{n_{q_1, i \rightarrow q_2, i+1}} S_{q_1, i \rightarrow q_2, i+1}^k(x) \right)}{\sum_{i=a_0}^{a_f} \left(\sum_{k=1}^{n_{q_1, i}} S_{q_1, i}^k(x) \right)} \quad (1)$$

avec $n_{q_1, i}$, le nombre d'ouvrages dans la classe q_1 à l'année i , $n_{q_1, i \rightarrow q_2, i+1}$, le nombre d'ouvrages passant de la classe q_1 à la classe q_2 entre l'année i et l'année $i+1$, $S_{q_1, i}^k(x)$, la surface d'ouvrage k classé en q_1 à l'année

i et $S_{q_1,i \rightarrow q_2,i+1}^k(x)$ la surface d'ouvrage passant de q_1 à q_2 entre l'année i et l'année $i+1$. La matrice de transition (qui regroupe les différentes probabilités de transition) peut alors être affinée suivant la nature des ouvrages en extrayant de la base de données les notes pour les différentes catégories d'ouvrages. A titre d'exemple, les matrices de transition des poutres caissons en béton précontraint (P_1), et des ponts mixtes (P_2) sont respectivement données (avec une précision de deux décimales) à l'Equation (2). Les matrices données à l'Equation (2) donne l'évolution moyenne d'un ouvrage appartenant au réseau national structurant français. Elle tient donc compte de l'ensemble des actions de maintenance qui sont effectuées chaque année sur le patrimoine. Dans la suite de l'étude, l'objectif étant de rechercher les actions de maintenance optimales à effectuer, il convient de ne tenir compte que de la dégradation annuelle des ouvrages et non plus de la maintenance annuelle puisque les ouvrages pris individuellement ne sont a priori pas entretenus entre deux interventions. Pour chaque ligne de la matrice P_i donnée à l'Equation (2), les termes sous la diagonale sont donc ajoutés au terme diagonal. Les matrices deviennent alors des matrices diagonales supérieures de dégradation pure donnée dans l'équation (3)

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0.84 & 0.12 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0.01 & 0.89 & 0.09 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0.14 & 0.85 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0.06 & 0.08 & 0.86 & 0 \\ 0.06 & 0 & 0.03 & 0 & 0.91 \end{pmatrix} \quad P_2 = \begin{pmatrix} 0.76 & 0.22 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 0.92 & 0.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0.07 & 0.91 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 & 0.85 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.20 & 0.80 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\tilde{P}_1 = \begin{pmatrix} 0.84 & 0.12 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0 & 0.90 & 0.09 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.99 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \tilde{P}_2 = \begin{pmatrix} 0.76 & 0.22 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 0.92 & 0.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.98 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Si la probabilité pour l'ouvrage b (de nature k) d'être dans chacune des classes IQOA est connue à l'année i et exprimée sous la forme d'un vecteur $q_b(i)$:

$$q_b(i) = \begin{pmatrix} q_{b,1}^i & q_{b,2}^i & q_{b,2E}^i & q_{b,3}^i & q_{b,3U}^i \end{pmatrix} \quad (4)$$

alors la probabilité à l'année $i+1$ est donnée par l'équation:

$$q_b(i+1) = q_b(i) \tilde{P}_k \quad (5)$$

La probabilité d'être dans chaque classe IQOA chaque année peut donc être déterminée si la matrice de transition et le vecteur probabilité $q_b(0)$ sont connus.

2.3. Marges d'évènements

A la $p^{ème}$ inspection, l'ouvrage b est caractérisé par le vecteur $q_b(T_{b,p}^{insp})$ obtenu à partir de l'état initial $q_b(0)$ en utilisant la matrice de vieillissement de l'ouvrage et l'Equation (5). Étant donné qu'il n'y a pas de loi générale pour estimer l'évolution de la dégradation de la structure de l'ouvrage, la probabilité d'envisager une maintenance de structure est calculée de manière non paramétrique. La démarche proposée est d'introduire des stratégies de maintenance relatives d'une part aux actions de maintenance structurales avec les actions structurales préventives (R_S) et les actions de réhabilitation (Reh), et d'autre part aux actions de maintenance d'équipement (R_{eq}). Ces stratégies sont modélisées par les vecteurs, notés respectivement, $\hat{p}_{r,R_S}$ and $\hat{p}_{r,Reh}$ pour les actions structurales et $\hat{p}_{r,R_{eq}}$ pour les actions de maintenance d'équipement. Ces vecteurs stockent des variables booléennes prenant uniquement les valeurs 0 ou 1 et déterminent les classes qui subissent les actions de maintenance. Pour l'ouvrage b ayant une inspection à l'instant $T_{b,p}^{insp}$, les marges d'évènement s'expriment de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_{rep,R_{eq}}^b(T_{b,p}^{int}) = P_{rep,R_{eq}}^b(T_{b,p}^{insp}) = \langle q_b(T_{b,p}^{insp}), \hat{p}_{r,R_{eq}} \rangle \\ P_{rep,R_S}^b(T_{b,p}^{int}) = P_{rep,R_S}^b(T_{b,p}^{insp}) = \langle q_b(T_{b,p}^{insp}), \hat{p}_{r,R_S} \rangle \\ P_{rep,Reh}^b(T_{b,p}^{int}) = P_{rep,Reh}^b(T_{b,p}^{insp}) = \langle q_b(T_{b,p}^{insp}), \hat{p}_{r,Reh} \rangle \end{cases} \quad (6)$$

avec $T_{b,p}^{int}$ l'instant de la $p^{ème}$ action de maintenance de l'ouvrage b . Par ailleurs, il est entendu que la décision prise à l'instant d'inspection $T_{b,p}^{insp}$ sera mise en œuvre à un instant d'intervention $T_{b,p}^{int}$ ultérieur dans le temps.

Dans le cas d'actions structurales il ne peut y avoir que trois résultats possibles à $T_{b,p}^{insp}$: "ne rien faire" (RF), "faire une action structurale" (R_s) ou "Réhabiliter l'ouvrage" (Reh). Concernant les actions de maintenance d'équipement, il ne peut y avoir que deux résultats : "ne rien faire" (RF) ou "faire une maintenance d'équipement" (R_{eq}). Un arbre d'évènement mixte est alors obtenu en incluant le critère « faire avec ou sans maintenance d'équipement » pour les deux premières branches de l'arbre de maintenance structurale. Ainsi, la première possibilité de maintenance structurale "Ne rien faire" devient "ne rien faire" (RF) ou "faire une maintenance d'équipement" (R_{eq}). De même, la seconde branche de l'arbre d'évènement structurale qui était "faire une action préventive" peut maintenant être effectuée sans ou avec une action de maintenance d'équipement (R_s or R_{s+eq}). Finalement, la branche réhabilitation (Reh) reste la même car est sensée déjà inclure des maintenances d'équipements (Figure 1).

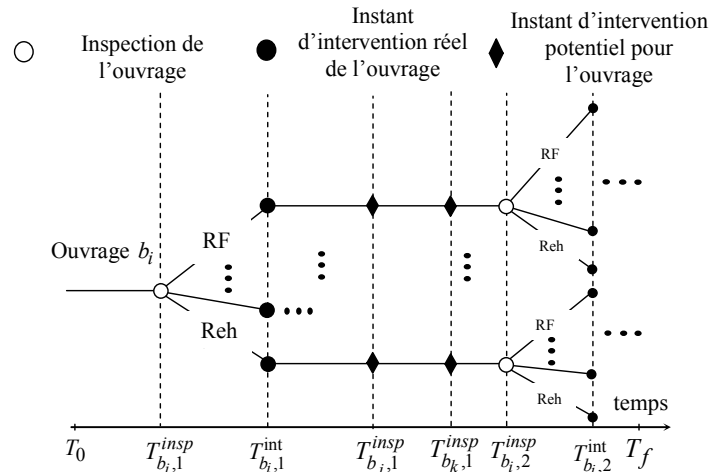
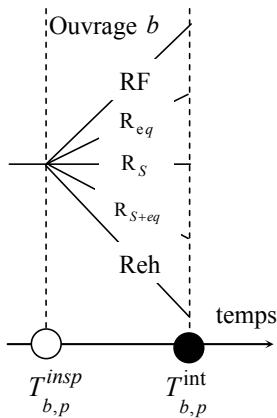


Figure 1. Arbre mixte d'évènements

Figure 2. Arbre d'évènements complet d'un ouvrage du réseau

La construction de l'arbre global d'évènements pour l'ouvrage b_i (Figure 2) permet d'estimer la probabilité d'avoir une action de maintenance et la probabilité de dysfonctionnement pour différents instants du planning. La probabilité de défaillance d'un ouvrage à l'instant t est fonction de toutes les interventions précédentes. L'expression de la probabilité de défaillance de l'ouvrage b_i est donnée à titre d'illustration pour $t < T_{b_i,1}^{int}$:

$$P_{f,b_i}(t) = q_{b_i,3U}^t p_{dem} \quad (7)$$

avec $q_{b_i,3U}^t$ la probabilité de l'ouvrage b_i d'être classé 3U à l'instant t , et p_{dem} la probabilité qu'un ouvrage en 3U subisse une action de réhabilitation. En France, environ 5% des ouvrages en 3U nécessitent une réhabilitation chaque année. Cette valeur est utilisée dans la suite de l'article pour quantifier p_{dem} .

2.4. Actions de maintenance

Les matrices de l'équation (3) représentent la stratégie "ne rien faire". L'impact des actions de maintenance sur la notation IQOA est modélisé en introduisant des matrices de transition. Quatre type d'actions de maintenance R_{eq} , R_s , R_{s+eq} , Reh étant définies, quatre matrices de maintenance sont introduites dans l'équation La position des 1 dans ces matrices définit directement le type d'action de maintenance.

$$\begin{aligned} M_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & M_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & M_3 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} & M_4 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

3. ÉTUDE DE COÛTS

Les usagers sont toujours supposés rechercher le trajet le plus efficace pour diminuer soit leur temps de trajet, soit le coût de leur trajet. La vitesse étant limitée par le volume de trafic, plus il y a de véhicule sur un axe routier, plus la vitesse globale des véhicules sera faible. La vitesse et donc le temps de trajet dépendent de la congestion selon l'équation du Highway Capacity Manual (TRB, 1985):

$$V = V_0 / \left(1 + 0,15 \left(\frac{f}{C} \right)^\eta \right), T = T_0 \left(1 + 0,15 \left(\frac{f}{C} \right)^\eta \right) \quad (9)$$

La recherche de la meilleure route tenant compte de la congestion s'effectue au travers de la recherche d'un équilibre de Wardrop (Wardrop, 1952), pour lequel le trafic se répartit sur l'ensemble des axes du réseau. Lorsque cet équilibre est atteint, les usagers ne peuvent théoriquement plus changer d'itinéraires pour espérer diminuer leur temps (ou coût) de trajet. Le coût de dysfonctionnement du réseau (MEDAD, 2005), (Boiteux, 2001), (Quadro, 2002) est alors défini comme la différence des coûts globaux aux usagers du réseau de transport lorsqu'un niveau de service adéquat est fourni, et les coûts lorsqu'un niveau de service adéquat n'est pas atteint pour un ou plusieurs ouvrages du réseau. Si un ou plusieurs ouvrages sont en état de dysfonctionnement dû à une action de maintenance ou à une défaillance de l'ouvrage, les coûts aux usagers sont calculés en recherchant d'abord un nouvel équilibre de Wardrop. Ce modèle permet de quantifier chaque événement se déroulant sur un ouvrage de manière globale à l'échelle du réseau de transport. Il est supposé dans la suite que les maintenances d'équipement et les maintenances structurales préventives (incluant R_{eq}, R_s, R_{s+eq}) nécessitent une réduction horaire de trafic de 30% et qu'une réhabilitation (Reh) nécessite une diminution de la capacité horaire de 60%. Concernant un dysfonctionnement de l'ouvrage non anticipé (appelé « défaillance »), il est considéré que le trafic sera diminué de 90% du fait de mesures de sécurité.

Concernant les coûts à la charge du gestionnaire, une étude précédemment menée a permis d'évaluer, pour plusieurs familles d'ouvrages, le coût surfacique des actions de remise à neuf sur un ouvrage en fonction de la classe IQOA (Binet 1996), (Odent, 1999). Ces coûts présentent l'avantage d'être détaillés pour plusieurs familles d'ouvrages telles que les ponts en béton armé (BA), les ponts en béton précontraint (BP), les poutres caissons (PC), les ponts en maçonnerie (MA) ou encore les ponts mixtes (M).

Les différents ouvrages d'art qui sont introduits dans cette étude à titre d'illustration sont présentés dans la Figure 3. Ils sont situés sur le réseau routier au sud-est de la région Île-de-France, soit sur des autoroutes urbaines ayant un rôle stratégique majeur dans le fonctionnement du réseau, soit sur des routes supportant un trafic très dense qui jouent également un rôle de premier ordre à l'échelle du réseau d'Île-de-France.

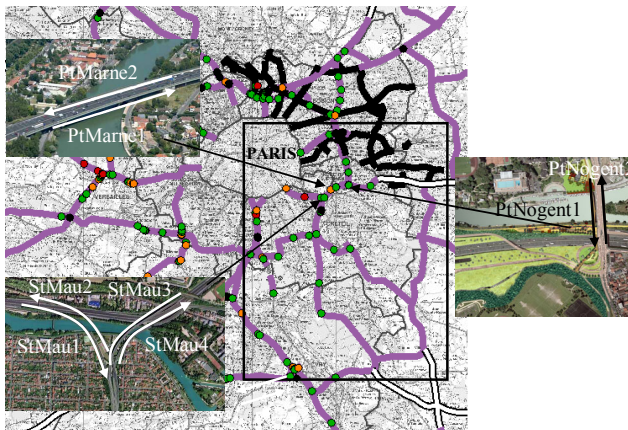


Figure 3. Réseau d'ouvrages

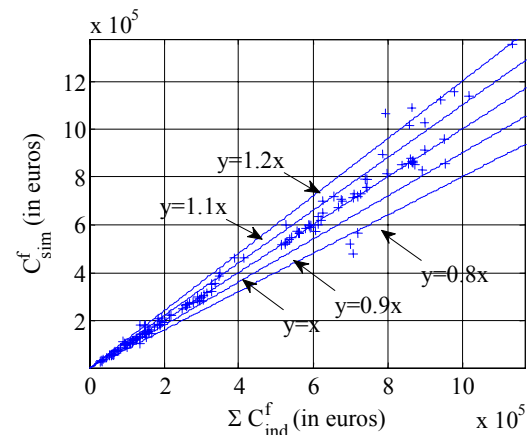


Figure 4. Mise en évidence de l'effet réseau

Du fait de la configuration du réseau, de la localisation des ouvrages, et de la demande de trafic, le gestionnaire a intérêt ou non à intervenir sur des ouvrages en même temps. La problématique de regrouper des actions de maintenance pour éviter une redondance de la gêne à l'utilisateur est bien connue des gestionnaires. Ce concept traduit en quelque sorte l'effet réseau qui fait que l'on ne peut pas considérer la maintenance des ouvrages comme une juxtaposition de stratégies individuelles mais réellement comme un ensemble de décisions qui entraînent une perturbation systématique de l'équilibre du fonctionnement du réseau de transport. Le schéma de la Figure 4 tente de visualiser « l'effet réseau ». La démarche consiste à opposer le coût supporté par les usagers en cas de perte de niveau de service simultanée pour deux ouvrages avec la somme des coûts supportés par les usagers dans le cas où la perte de niveau de service intervient à des instants différents pour les deux ouvrages. Si les deux coûts sont égaux, le point se situe sur la bissectrice et les deux ouvrages peuvent être considérés comme globalement

indépendants. Si le point se situe au-dessus de la bissectrice, la combinaison des deux ouvrages est alors globalement défavorable. En effet, les usagers supporteront une gêne plus forte si la maintenance est effectuée en même temps que si elle est effectuée à des instants différents.

Au contraire, si le point est sous la bissectrice, la combinaison est favorable et le gestionnaire a tout intérêt à effectuer les deux actions de maintenance en même temps sur les ouvrages.

Les coûts des diverses actions de maintenance et de la défaillance sont illustrés pour le gestionnaire (Figures 5 et 6) et pour les usagers (Figures 7 et 8) pour deux combinaisons d'ouvrages du réseau étudié. Les coûts aux usagers sont obtenus à l'aide des simulations d'affectation de trafic. Les simulations permettent de quantifier les coûts journaliers aux usagers lorsqu'une perte de capacité de trafic a lieu sur deux ouvrages simultanément, cette perte pouvant être la conséquence d'une action de maintenance d'équipement uniquement (Req), d'une action de maintenance structurale préventive (RS), d'une action de maintenance structurale préventive accompagnée d'une action de maintenance d'équipement (RS+eq), d'une action de réhabilitation (R) ou encore d'une défaillance survenant sur l'ouvrage (Def). En comparant les figures 5 et 6, puis les figures 7 et 8, il apparaît qu'une combinaison peut être plus défavorable qu'une autre pour le gestionnaire, mais plus favorable pour les usagers. Cette complexité due à la configuration du réseau joue donc une grande importance dans l'équilibre des coûts.

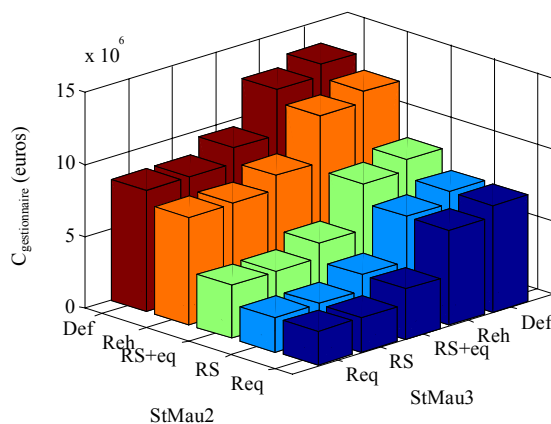


Figure 5. Coûts au gestionnaire pour StMau2/StMau3

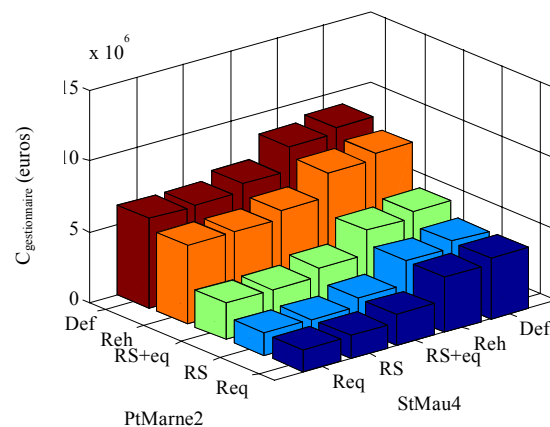


Figure 6 Coûts au gestionnaire pour PtMarne2/StMau3

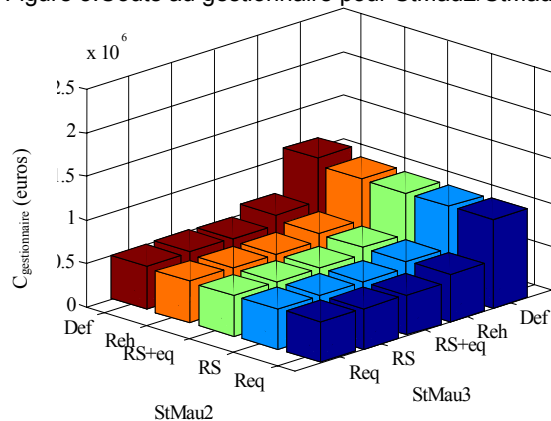


Figure 7. Coûts aux usagers pour StMau2/StMau3

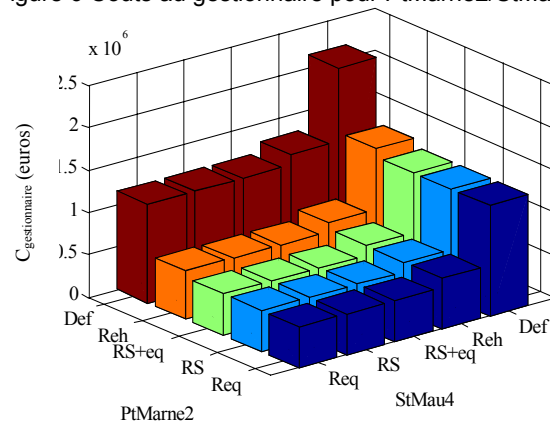


Figure 8. Coûts aux usagers pour PtMarne2/StMau3

4. OPTIMISATION DES PLANNINGS DE MAINTENANCE

Le principe de base du processus d'optimisation est le suivant : dans un premier temps, les instants d'intervention sont recherchés de manière à minimiser le coût global moyen du planning de maintenance tout en respectant des contraintes sur la performance des ouvrages, cette performance étant exprimée à l'aide de la notation IQOA (Orcesi, 2009). Le coût prend en compte tous les résultats d'inspection possibles en les pondérant par leur probabilité d'occurrence (à l'aide de l'arbre d'événement de la Figure 2). Dans un deuxième temps, les instants d'intervention qui ont été déterminés précédemment sont fixés et les actions optimales sont déterminées. Cette démarche en deux temps peut être menée soit en minimisant la somme des coûts du gestionnaire et des usagers, ce qui revient à trouver l'optimum global du problème de l'offre et de la demande, soit en minimisant de manière séparée les coûts du gestionnaire et les coûts des usagers, ce qui revient à chercher le meilleur compromis entre les usagers et le gestionnaire à travers la détermination de fronts de Pareto (Horn, 1994). Cette optimisation est réalisée par algorithmes génétiques (Deb, 2001), (Coello, 2002). Les huit ouvrages du réseau Île-de-France de la

Figure 3 sont alors considérés. Les ouvrages PtMarne1, PtMarne2, StMau1, StMau2, StMau3 et StMau4 sont des ouvrages de type poutres caissons en béton précontraint. Les ouvrages PtNogent1 et PtNogent2 sont les deux voies de circulation d'un pont mixte acier-béton.

Les résultats du processus d'optimisation sont présentés dans les figures 9 et 10 pour un premier cas de contrainte. Dans cet exemple, la contrainte porte sur l'indicateur d'entretien courant *IEC* (cf. Tableau 2). La probabilité d'être en classe 1 ou 2 doit rester supérieure à 45% à la fin du planning. Le front de Pareto obtenu lors de la première étape du calcul d'optimisation est alors montré à la Figure 9 pour un calcul mono-objectif et pour un calcul multi-objectif. Le résultat des actions optimales et l'évolution liée de l'indicateur $1 - IEC$ sont alors donnés à la Figure 10 et correspondent à la solution mono-objectif. Un deuxième cas de contrainte est présenté : l'objectif est maintenant de contrôler la probabilité d'appartenance à la classe 3U (Indice de Réparation Urgente *IRU* défini dans le Tableau 2). La contrainte peut être appliquée uniquement à la fin du planning (T_f) ($C_1 : \{IRU(T_f) < 0.10\}$) ou de manière linéaire dans le temps ($C_2 : \{IRU(t) < 0.30 - 0.008t\}$ et $C_3 : \{IRU(t) < 0.15 - 0.002t\}$). Les fronts de Pareto obtenus lors de la première étape (recherche des instants optimaux d'intervention) sont montrés à la Figure 11 pour les trois cas de contrainte. Pour la solution mono-objectif d'instants, le calendrier d'actions optimales obtenu lors de la deuxième étape est illustré par les figures 12, 13 et 14 pour les trois cas de contrainte respectivement.

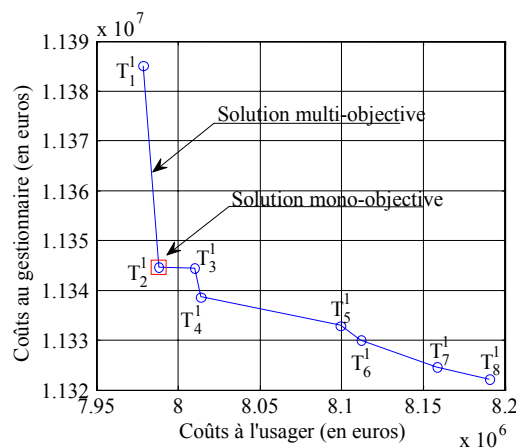


Figure 9. Solutions mono et multi-objectifs pour $P(X(T_f) = 2E, 3, 3U) = 1 - IEC(T_f) < 55\%$

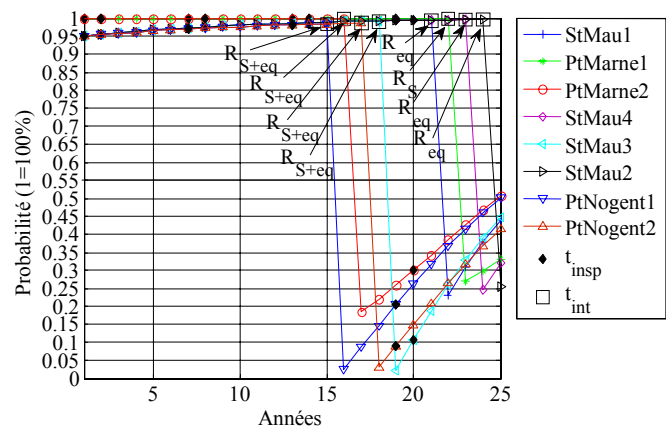


Figure 10. Evolution de l'indicateur $1 - IEC$ pour chacun des ouvrages si $P(X(T_f) = 2E, 3, 3U) = 1 - IEC(T_f) < 55\%$

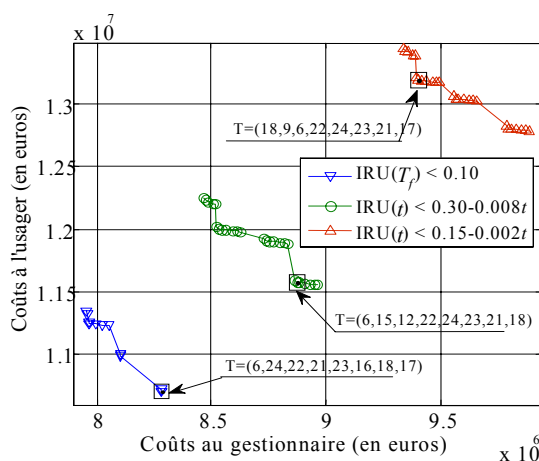


Figure 11. Solutions mono et multi-objectifs d'instants d'intervention pour les contraintes C_1, C_2 et C_3

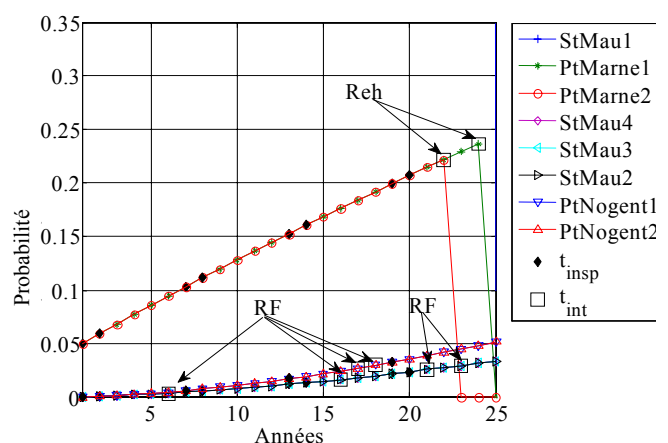


Figure 12. Evolution de l'indicateur *IRU* pour chacun des ouvrages (contrainte C_1)

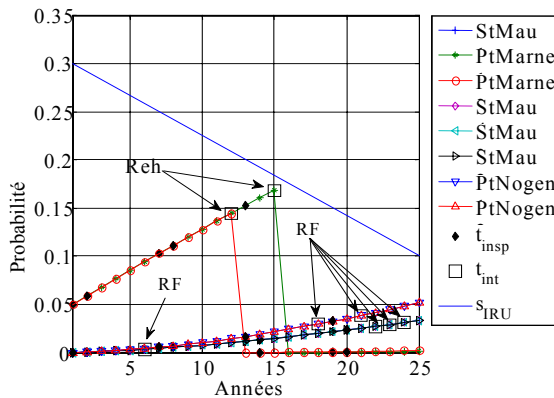


Figure 13. Evolution de l'indicateur IRU pour chacun des ouvrages (contrainte C_2)

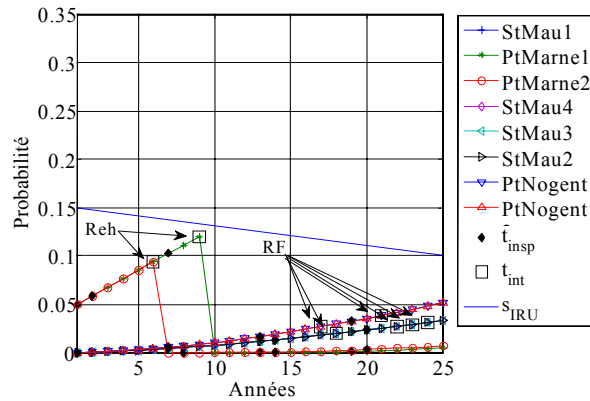


Figure 14. Evolution de l'indicateur IRU pour chacun des ouvrages (contrainte C_3)

5. CONCLUSIONS

La démarche proposée a pour objectif de fournir un outil d'aide à la décision pour le gestionnaire d'un réseau d'ouvrages. Le problème étant abordé à l'échelle du réseau d'ouvrages, le gestionnaire peut prendre connaissance des décisions optimales dans le temps pour atteindre un objectif à l'horizon du planning de gestion. Le calcul d'optimisation en deux étapes permet de déterminer les calendriers optimaux de maintenance, soit en minimisant la somme des coûts du gestionnaire et des usagers, ce qui revient à trouver l'optimum global du problème de l'offre et de la demande, soit en minimisant de manière séparée les coûts du gestionnaire et les coûts des usagers, ce qui revient à chercher le meilleur compromis entre les usagers et le gestionnaire à travers la détermination de fronts de Pareto. Cet outil est particulièrement pertinent dans le cas d'un réseau structurant sur le territoire tel que le réseau routier national français par exemple. La formulation générale du problème d'optimisation permet par ailleurs d'envisager l'application de la méthodologie à une large gamme de réseaux d'infrastructures.

6. RÉFÉRENCES

- Binet C., 1996. Condition and repair cost estimate of the French road bridge assets, Recent Advances in Bridge Engineering. *Proceedings of the US-Europe Workshop on Bridge Engineering*, Juillet 1996.
- IQOA, 1996. *Guide des visites IQOA, catalogue des désordres*. MEEDDAT.
- Odent N. & al., 1999. Impact d'une politique de gestion sur l'état d'un patrimoine d'ouvrages en béton armé. *Revue Ouvrages d'Art*, SETRA, 33, 18-28.
- Wardrop A., Dowling R., 1952. Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Part II, 325-378.
- MEDAD, 2005. *Instruction-cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructure de transport*. Ministère de l'Aménagement du territoire, de l'Équipement et des Transports, Mai 2005.
- Boiteux M., Willumsen L.G., 2001. *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances*. Commissariat général au plan, Juin 2001.
- Deb K., 2001. *Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Chichester, U.K. Wiley.
- Coello C. & al., 2002. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Kluwer Academic Publishers, New York.
- Horn J. & al., 1994. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization, *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Piscataway N.J. : IEE press, 82-87.
- Orcesi A., 2009. Etude de la performance des réseaux d'ouvrages d'art et détermination des stratégies de gestion optimales. ERLPC OA 64, Presses du LCPC.
- Orcesi A, Cremona C., 2007. Optimization of management strategies applied to the national reinforced concrete bridge stock in France. *International symposium on Integrated Life-cycle Design Management of Infrastructures*, Shanghai, China.
- TRB, 1985. *Highway capacity manual*. Special report 209, National Research Council, Washington.
- Quadro, 2002. The QUADRO Manual, Economic assesment of road maintenance. Nov. 2002.