

Systèmes de drainage à pertes de charge minimales (Minimum Energy Loss Culverts) : Concept et retour d'expérience

Development and Experience of Minimum Energy Loss in culverts designs

Hubert Chanson

Professeur, Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australie
Tél. : (61 7) 33 65 43 63 — Fax : (61 7) 33 65 45 99 — E-mail : h.chanson@uq.edu.au

Culverts are among the most common hydraulic structures. Modern designs do not differ much from ancient structures and are characterised by significant afflux at design flow conditions. A major advance in hydraulic engineering was the development of Minimum Energy Loss (MEL) culverts by the late Professor Gordon McKAY in the late 1950s. The design technique allows a drastic reduction in afflux associated with lower costs. The successful operation of MEL culverts for more than 40 years demonstrate the design soundness while highlighting the importance of streamlining and near-critical flow conditions throughout the structure. The novelty of the MEL culvert design is emphasised. Further information are available on the Internet {http://www.uq.edu.au/~e2hchans/mel_culv.html}, a video documentary (Apelt, 1994) and a chapter of the textbook Chanson (1999, 2004a).

1 ■ INTRODUCTION

Les buses et canaux de drainage à ciel ouvert (culverts, waterways) font partie des ouvrages hydrauliques les plus courants, en génie civil. Ce type d'ouvrage a été employé depuis plus de trois mille ans. Bien que l'on ne connaisse pas exactement le plus ancien système de drainage, ces ouvrages étaient utilisés, durant l'Antiquité, par les Minoens en Crète, et les Etrusques en Italie du Nord (Evans, 1928 ; O'Connor, 1993). Plus tard, les Romains ont construit de nombreuses buses de drainage, sous leurs routes et leurs aqueducs (Ballance, 1951, O'Connor 1993 ; Chanson, 2002).

De nos jours, les systèmes de drainage (buses, ponceaux, canaux) sont très similaires aux designs anciens des Romains et des Etrusques (*fig. 1*). Durant la conception, la contrainte de dimensionnement la plus importante est un coût minimum, bien que d'autres aspects du dimensionnement puissent inclure un niveau maximum des eaux en période de crues, ou un système de protection contre l'affouillement en sortie de la buse. Dans la très grande majorité des cas, les buses et canaux de drainage sont caractérisés par un *afflux* important pour le débit de conception (Q_{des}). L'afflux est l'accroissement de la hauteur des eaux, en amont, causée par la présence de l'ouvrage. Il est une mesure des inondations causées par la structure. Plusieurs types de solutions ont été proposées pour réduire la hauteur d'eau amont, pour un débit de conception donné : par exemple, en arrondissant les bords d'entrée, avec une entrée convergente de forme conique, parabolique

ou même en taille de guêpe. Toutes ces solutions sont marginales, avec des résultats ne justifiant pas l'accroissement des coûts de construction.

Les années mille neuf cent cinquante et soixante ont été marquées par un tournant dans le développement de ponceaux et systèmes de drainage, avec l'introduction d'un nouveau design en Australie : c'est le système de drainage à Pertes de Charge Minimales (Minimum Energy Loss Culvert) permettant de réaliser des ouvrages de drainage avec un afflux nul (zero afflux). La présente étude a un but multiple. Tout d'abord, on explique la conception des ouvrages de drainage à Pertes de Charge Minimales, et on documente leurs performances durant les quarante dernières années. Ensuite, on montre que ce type d'ouvrage a un champ d'application plus vaste que le continent australien, et qu'il est une alternative viable dans des projets internationaux et européens auxquels participent les ingénieurs français et francophones.

II ■ DÉFINITIONS

Une buse de drainage, ou ponceau (culvert), est un canal couvert, souvent de courte longueur, destiné à faire transiter des eaux de crues et d'orages sous un remblai. Un canal de drainage à ciel ouvert (waterway) a le même but, mais n'est pas couvert. La *figure 2* en présente un exemple. La partie la plus resserrée du conduit est appelée le goulot (barrel, throat) (*fig. 3A*).



Figure 1 : Buse de drainage conventionnelle (entrée),
Oxenford QLD (Australie), le 18 sept. 2003, $Q_{des} \sim 30 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figure 2 : Canal de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM), Brisbane,
Australie — $Q_{des} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, $B_{max} = 33,5 \text{ m}$, $B_{min} = 11,2 \text{ m}$, $L_{barrel} = 87 \text{ m}$, $\Delta z_0 = 1,3 \text{ m}$, afflux nul,
construit en 1975. Vue de l'entrée, en regardant vers l'aval, durant une étude sur le terrain
avec des étudiants, le 18 sept. 2003 — Ce système de drainage est destiné à éviter le débordement
des eaux d'orage sur la route, à gauche, qui est une artère importante et passant sous une autoroute.

III ■ CONCEPTS DE BASE

La conception des systèmes de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) est basée sur deux caractéristiques fondamentales.

(1) En premier, l'ouvrage est profilé pour réduire au minimum les pertes de charges, et éliminer toute résistance de forme et perte de sillage. Ceci est réalisé en amenant les eaux de crues dans un canal d'entrée profilé, conduisant le flot dans le goulot, puis avec un canal de sortie ramenant les eaux vers le lit de la rivière en aval, en évitant toute séparation et décollement turbulent (fig. 3A). Les canaux d'entrée

et de sortie sont conçus pour éliminer les pertes de forme (form drag), et la conception du canal de sortie est particulièrement importante. Au total, pour une structure conçue pour un afflux nul, les pertes de charge dans l'ouvrage ne doivent pas être supérieures au produit de la ligne de pente par la longueur totale de la structure.

(2) Deuxièmement, l'ouvrage fonctionne en écoulement à surface libre critique, partout entre la lèvres d'entrée et la lèvres de sortie : c.a.d., $d = d_c$ où d est la hauteur d'eau et d_c est la profondeur critique. On rappelle que le débit par unité de largeur est maximum, pour une charge spécifique donnée, aux conditions d'écoulement critique.

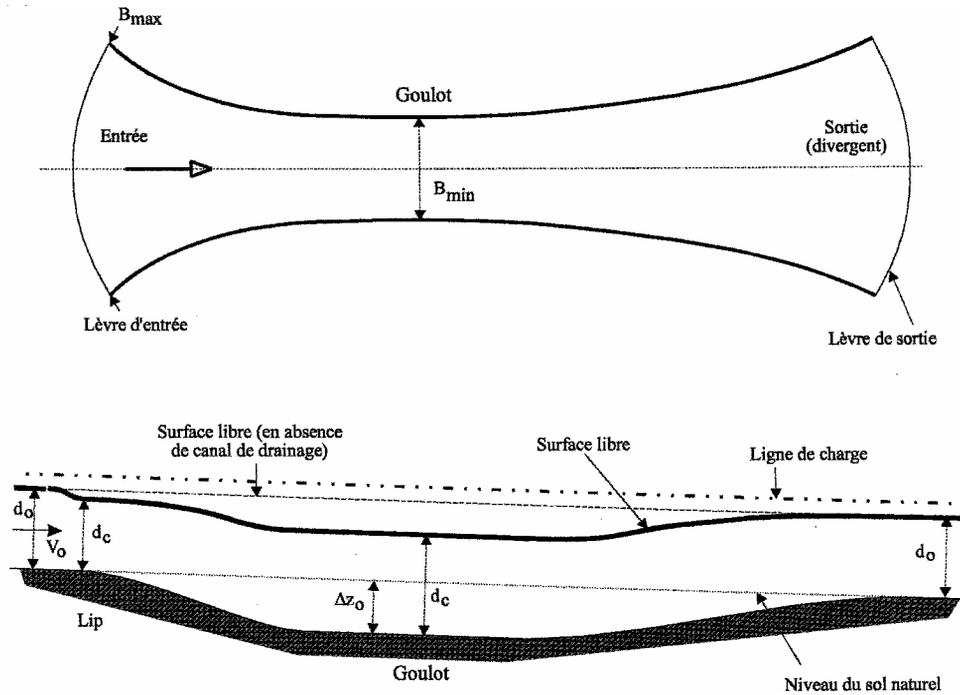
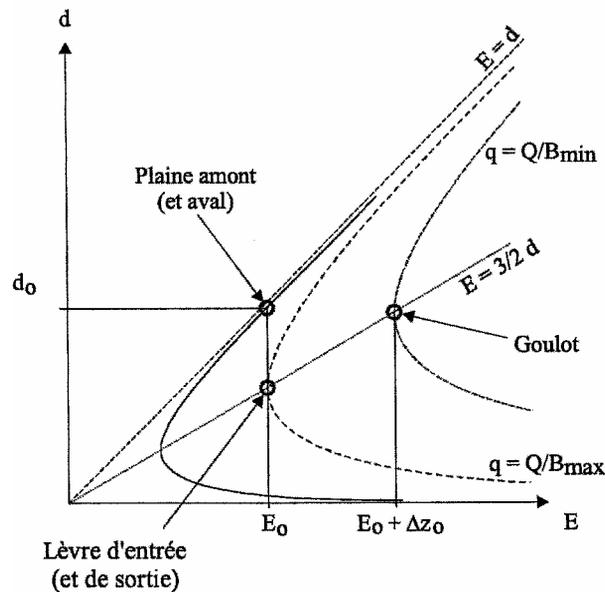


Figure 3 : Système de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM).
(A) Schéma d'un système de drainage PCM.



(B) Relation entre la charge spécifique E et la hauteur d'eau d dans un écoulement à surface libre : application à un système de drainage PCM (design avec afflux nul)

Pratiquement, les systèmes de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) sont conçus comme des ouvrages à surface libre, à sections rectangulaires¹. Pour une charge spécifique amont donnée, la largeur de la lèvre d'entrée est sélectionnée pour obtenir un écoulement critique (*fig. 3B*). La largeur du goulot peut être réduite en augmentant le débit par unité de largeur, si on rabaisse l'élévation du coursier, ainsi que cela est montré sur la *figure 3*. Il en résulte une augmentation locale de la charge spécifique E , de la profondeur critique d_c et donc du débit par unité de largeur. Ceci est illustrée sur la *figure 3B*, montrant la variation de la charge spécifique avec la hauteur d'eau, pour une structure avec afflux nul, et où d_0 est la profondeur d'eau dans la plaine d'inondation en absence de l'ouvrage. De plus, les pertes de charge dans le ponceau sont minimisées en réduisant les pertes de frottement (skin friction) dans les sections construites en béton, et en éliminant les pertes de sillage, en particulier dans la section de restitution : c.a.d., le divergent.

IV ■ APPLICATION PRATIQUE

Considérons un cas pratique pour lequel les paramètres hydrauliques de dimensionnement sont le débit Q_{des} associé à une charge spécifique E_0 ² dans la plaine d'inondation en absence de l'ouvrage de drainage. Pour un ouvrage avec afflux nul, en première approximation, la largeur de lèvre doit satisfaire le principe de Bernoulli :

$$B_{max} = \frac{Q_{des}}{\sqrt{g \left(\frac{2}{3} E_0 \right)^3}} \quad (1)$$

où B_{max} est la largeur de lèvre mesurée perpendiculairement aux lignes de courant. L'équation (1) est déduite de la définition de la profondeur critique pour un canal rectangulaire. Dans le canal d'entrée, l'écoulement est critique en tout point, entre la lèvre d'entrée et le goulot. Il y a, de ce fait, une relation unique entre la largeur B et la profondeur d'excavation Δz , pour un débit et une charge totale donnée (ex. Chanson, 2004a, pp. 442 & 461-465). La largeur du goulot B_{min} doit être égale à :

$$B_{min} = \frac{Q_{des}}{\sqrt{g \left(\frac{2}{3} (E_0 + \Delta z_0) \right)^3}} \quad (2)$$

où Δz_0 est la profondeur d'excavation (*fig. 3A*). En pratique, la largeur du goulot B_{min} , ou la profondeur maximale du goulot Δz_0 , sont imposées, principalement, par des considérations économiques : ex., coûts des excavations.

Entre la lèvre d'entrée et le goulot, les lignes de contour d'excavation, incluant la lèvre d'entrée, sont des lignes équipotentielles, qui doivent être perpendiculaires, en tout point, aux lignes de courant. On note que les murs latéraux du

canal d'entrée sont aussi des lignes de courant. Pratiquement, le canal d'entrée peut être conçu avec une méthode graphique (ex. méthode des petits carreaux) basée sur la théorie des fluides parfaits (e.g. Vallentine, 1969).

Le lecteur trouvera de plus amples détails dans l'article important d'Apelt (1983), qui est complété par un documentaire vidéo (Apelt, 1994), tandis que des ouvrages ont été décrits et illustrés par l'auteur (Chanson, 1999, 2000, 2001, 2004a).

V ■ DÉVELOPPEMENT HISTORIQUE DES SYSTÈMES DE DRAINAGE À PERTES DE CHARGE MINIMALES (PCM)

Le concept des systèmes de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) a été développé par le Professeur Gordon Reinecke McKay (1913-1989), professeur en génie civil à l'Université de Queensland entre 1951 et 1978 (McKay, 1971, 1978 ; Apelt, 2002).

Le premier ouvrage fut réalisé en 1960, au Nord de Brisbane : le système de drainage de Redcliffe, ou de Humpybong Creek. Il consiste en un petit déversoir, connecté à un goulot long de 137 m, et déchargeant dans l'océan Pacifique (*fig. 4A*). Le déversoir était conçu pour empêcher le sable, et l'eau salée, de remonter dans le cours d'eau Humpybong Creek, tandis que le ponceau passe sous un centre commercial, sans afflux pour le débit de dimensionnement $Q_{des} = 26 \text{ m}^3/\text{s}$. L'ouvrage est toujours en usage de nos jours, et, durant plus de quarante ans, il a fait passer, avec succès, des crues bien supérieures au débit de conception en plusieurs occasions (McKay, 1970).

Depuis, plus de 150 ouvrages ont été construits en Australie Orientale. De nombreux petits ouvrages ($Q_{des} < 5 \text{ m}^3/\text{s}$) ont été réalisés dans l'état du Victoria, principalement sous la direction, ou l'influence, de l'ingénieur Norman Cottman. Dans l'état du Queensland, des structures plus importantes ont été conçues, testées en modèle physique, et construites sous la supervision des professeurs Gordon McKay et Colin Apelt³, particulièrement près de Brisbane (*fig. 4B*). La plupart de ces ouvrages de drainage ont été développés pour un afflux nul. L'ouvrage le plus important est le canal de drainage PCM de Nudgee Road, près de l'aéroport international de Brisbane, avec une capacité de $850 \text{ m}^3/\text{s}$. L'ouvrage a été construit, entre 1968 et 1970, en remblai avec un radier recouvert d'herbe courte. Depuis, il a fait passer, avec succès, des crues, égales et supérieures au débit de conception. Plusieurs systèmes de drainage PCM ont été réalisés sous l'autoroute reliant Brisbane à la Gold Coast (South-East Freeway) en 1975, avec un débit de conception compris entre 170 to $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (*fig. 4B*). Ces ouvrages sont en opération plusieurs jours par an (*fig. 5*). McKay (1971) et Cottman (1976) ont décrit d'autres structures, construites dans le Territoire du Nord et dans le Victoria. Par exemple, le canal PCM du Newington bridge (1975, $Q_{des} = 142 \text{ m}^3/\text{s}$). En 1975 et 1988, des crues, de l'ordre de 122 and $150 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement, sont passées sans causer le moindre dégât (Cottman and McKay, 1990).

1. Ce type d'ouvrage peut être conçu avec des sections non-rectangulaires, mais le surcroît de complexité justifie rarement un tel choix. L'auteur ne connaît aucun ouvrage construit avec des sections non-rectangulaires.

2. La profondeur d'eau d_0 et la charge spécifique E_0 , dans la plaine d'inondation, sont des fonctions du débit et des caractéristiques de la vallée. Elles sont déduites d'une analyse de courbe de remous.

3. Professeur en génie civil à l'Université de Queensland (à la retraite).



Figure 4 : Systèmes de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) en Australie.
 (A) Divergent du système PCM de Redcliffe en sept. 1996 — $Q_{des} = 26 \text{ m}^3/\text{s}$, $B_{min} = 5,5 \text{ m}$,
 $L_{barrel} = 137 \text{ m}$, $\Delta z_0 = 1,16 \text{ m}$, $D = 3,5 \text{ m}$, afflux nul — Vue de la sortie, en regardant vers l'aval.



(B) Entrée de système PCM de Ridge Street, le long de Norman Creek,
 en mai 2002 — $Q_{des} = 220 \text{ m}^3/\text{s}$, $B_{max} = 42 \text{ m}$, $B_{min} = 21,3 \text{ m}$, $L_{barrel} = 54 \text{ m}$, $\Delta z_0 = 0,6 \text{ m}$,
 $D = 3,0 \text{ m}$, afflux nul — Vue vers l'aval.



Figure 5 : Fonctionnement du système de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) de Ridge Street (Brisbane, Australie), le 31 déc. 2001, en fin d'orage ($Q \sim 60$ à $80 \text{ m}^3/\text{s}$) — $Q_{\text{des}} = 220 \text{ m}^3/\text{s}$, $B_{\text{max}} = 42 \text{ m}$, $B_{\text{min}} = 21,3 \text{ m}$, $L_{\text{barrel}} = 54 \text{ m}$, $\Delta z_0 = 0,6 \text{ m}$, $D = 3,0 \text{ m}$ — Convergent du système PCM — Vue vers l'amont —
On note, au premier plan, un ressaut hydraulique dans le canal d'entrée, typique d'un débit inférieur au débit de conception, et, en arrière-plan, un canal de drainage à Pertes de Charge Minimales (fig. 2) sous l'autoroute.

On note que les ingénieurs canadiens, américains et anglais ont montré un intérêt certain pour le concept des ouvrages de drainage PCM. Par exemple, on peut citer les travaux de Lowe (1970) et Loveless (1984), et les documents Federal Highway Administration (1985, p. 114) et Hamill (1999). Deux études sur modèle physique, au Canada (Lowe, 1970) et en Angleterre (Loveless, 1984), ont démontré que les ouvrages PCM peuvent faire passer, avec succès, des blocs de glace, et du transport solide, sans blocage ni dépôt. Ces résultats ont été confirmés par des inspections de systèmes de drainage PCM, après des crues importantes, illustrant une absence de dépôt de matériaux solides.

VI ■ EXPÉRIENCE ET LEÇONS

Les systèmes de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) ont fonctionné, depuis plus de quarante ans⁴, avec des conditions hydrologiques difficiles, incluant des climats quasi-tempérés, semi-tropicaux, tropicaux et désertiques selon la région. On peut en tirer un certain nombre de leçons pratiques, en se basant non seulement sur cette expérience, mais aussi après discussions avec des ingénieurs responsa-

bles de la conception, des inspections sur le terrain durant et après des crues (fig. 2, 4 et 5), des relevés détaillés d'un certain nombre d'ouvrages, et des études de base sur modèles physiques à l'Université de Queensland.

Plusieurs ouvrages, toujours en fonctionnement de nos jours, ont été soumis à des débits maximum de crues supérieurs au débit de dimensionnement. Des inspections détaillées, par des experts hydrauliques, après les crues, ont démontré le bien-fondé des concepts de base, un fonctionnement parfait de ce type d'ouvrage, et une maintenance très réduite. McKay (1970, 1971) présenta les idées de base, mais le Professeur Colin Apelt a insisté très fortement sur l'importance d'une conception hydraulique saine, du profil soigné de l'ouvrage (pour réduire la résistance de forme) et d'un fonctionnement avec un écoulement critique ($Fr = 1$) ou trans-critique ($Fr = 0,6$ à $0,8$) (Apelt, 1983, 1994). Toute séparation ou décollement turbulent de l'écoulement doit être évité. Dans un cas, l'ouvrage de Cornwall Street (Brisbane), un décollement de la couche limite dans le coude du canal d'entrée est observé, entraînant une zone de recirculation intense dans le goulot. Cette structure ne peut faire passer que 50 % du débit de dimensionnement avant le débordement du remblai et l'inondation de la route. De plus, la conception du divergent est un aspect crucial du design, afin d'empêcher la formation d'écoulement supercritique ($Fr > 1$) et décollement turbulent dans le canal de sortie (Apelt, 1983).

4. Par exemple, la buse de drainage PCM de Redcliffe a fonctionné plus de 45 ans !

Enfin, un certain nombre de considérations pratiques doivent être prises en compte. Les systèmes de drainage PCM doivent être équipés d'un drain, pour empêcher l'eau de rester dans le goulot en fin de crue (quand le radier du goulot a été excavé). En règle générale, ce drain doit être à ciel ouvert, plutôt qu'un tuyau. On devine un tel type de drain à ciel ouvert sur la *figure 2*, en bas à gauche et en arrière plan. Un problème plus récent est une perte d'expertise hydraulique, dans certains services d'assainissement, comme à Brisbane. Par exemple, deux ouvrages de drainage PCM ont subi une dégradation de leurs performances hydrauliques, faisant suite à la construction d'une nouvelle voie pour bus, 25 ans après la construction de ces structures PCM (*fig. 6*). Il en résulte qu'une voie de passage importante (Marshall Road, avec 4 voies) sera inondée pour toute nouvelle crue moyenne inférieure au débit de dimensionnement, car l'écoulement dans le canal d'entrée est très fortement perturbé par la présence de piles de soutènement (*fig. 6*)⁵.

VII ■ REMARQUES

Dans tous les cas, la conception des systèmes de drainage doit être basée sur une logique économique, incluant les coûts de construction, de la conception ingénierie hydraulique, incluant les essais sur modèle(s) physique(s), et des dégâts causés par une inondation. Cela entraîne toujours une comparaison entre un système de drainage conventionnel, moins cher à concevoir et à construire, et un système PCM plus efficace hydrauliquement. Un système de drainage PCM

n'est choisi que si ce type d'ouvrage est le moins cher. Par exemple : le système PCM de Redcliffe (*fig. 4A*) a coûté l'équivalent de 500 000 Euros de nos jours⁶, et il a permis le développement d'un centre commercial d'une valeur de 35 millions d'Euros⁷. Un système de drainage conventionnel aurait du être 27 fois plus large ! Un autre exemple : le canal PCM de Nudgee Road a permis une économie de 1 million d'Euros de nos jours⁸. Enfin, le canal PCM de Newington Bridge a coûté 6 fois moins cher qu'une structure conventionnelle.

Il faut souligner que les systèmes de drainage PCM peuvent être conçus pour un afflux non nul. Le processus de dimensionnement n'est pas tellement plus compliqué (e.g. Chanson, 2004a). Toutefois, il faut souligner que la conception des ouvrages de drainage PCM a été développée et appliquée uniquement pour des canaux de sections rectangulaires (McKay, 1970, 1971). L'utilisation d'autres types de sections entraîne un accroissement très important de la complexité des calculs hydrauliques.

On ajoute qu'un ouvrage de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) n'a pas besoin d'être droit ni symétrique. Il peut avoir une forme courbe, comme le canal PCM de la *figure 2*, ou les canaux PCM de Nudgee Road et Newington Bridge.

On notera que les vitesses de l'écoulement dans le goulot sont, en général, importantes dans les ouvrages de drainage à Pertes de Charge Minimales (ex. 3,6 m/s à Redcliffe). Mais les niveaux de turbulence sont relativement faibles, grâce au profil « lisse » de la structure. De ce fait, le radier du canal de drainage peut être en terre ou en herbe.



Figure 6 : Entrée du système de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) de Marshall Road (Brisbane, Australie) — Conception originale en 1975 : $Q_{des} = 170 \text{ m}^3/\text{s}$, afflux nul — Vue vers l'aval en août 2000 — Le lecteur notera la présence de deux piles supportant la nouvelle voie de bus, construite entre 1999 et 2000.

5. L'auteur l'a observé de ses propres yeux durant une crue modérée récente.

6. C.a.d, AUD\$70,000 en 1960.

7. C.a.d, 5 millions de dollars australiens de l'époque.

8. C.a.d., AUD\$250,000 en 1970.

VIII ■ DISCUSSION

Vue d'en haut, un ouvrage de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) a une forme de type Venturi ou sablier (fig. 3). Plusieurs études ont montré une forme similaire durant le développement d'une brèche de digue, en matériaux non-cohésifs (e.g. Coleman *et al.*, 2002) (fig. 7). Cette analogie fut proposée en premier par le professeur Gordon McKay, discutant l'affouillement entre piles de ponts (McKay, 1970). Elle a été aussi avancée pour les ruptures de digues et dunes en zones côtières (Gordon, 1981, 1990). Récemment, l'auteur ré-analisa les mesures très détaillée de Coleman *et al.* (2002), conduites durant le développement d'une brèche de remblai sablonneux, sur modèle physique de grande taille (Chanson, 2003, 2004b). Les résultats de cette analyse ont démontré que, pour une brèche de digue en matériaux non-cohésifs, : (1) l'écoulement est trans-critique (i.e. $0,5 < Fr < 1,8$) dans l'entrée de la brèche et dans le goulot, (2) la charge reste, dans cette section, pratiquement constante⁹, et (3) les pertes de charge ont lieu en aval du goulot, avec décollement de l'écoulement turbulent et le développement de zones de recirculation de part et d'autre du jet (fig. 7).

IX ■ CONCLUSION

Dans les années 1950-1960, des ingénieurs australiens ont introduit un nouveau concept de système de drainage : le système de drainage à Pertes de Charge Minimales (Minimum Energy Loss Culvert). Cette technique permet de réaliser des canaux de drainage avec un afflux nul, réduisant considérablement les inondations amont causées par l'ouvrage. Leur conception est basée sur un design profilé pour éliminer les pertes de forme, et un fonctionnement en écoulement critique, pour le débit de dimensionnement. Les systèmes de drainage à Pertes de Charge Minimales (PCM) ont fonctionné, avec succès, pendant plus de quarante ans, souvent dans des conditions hydrologiques extrêmes. Cette expérience unique démontre le bien-fondé des concepts de base, associé à une maintenance réduite, et un coût pouvant être très inférieur à celui des structures conventionnelles.

L'expérience australienne indique, de plus, que ces ouvrages de drainage PCM sont particulièrement bien adaptés aux plaines d'inondations avec faibles gradients ($S_0 \sim 0,001$, voire moins) et pour des bassins versants caractérisés par des précipitations intenses entraînant des crues importantes. Bien que la conception hydraulique de l'ouvrage PCM nécessite un niveau élevé d'expertise (Bac + 4 minimum), la construction elle-même peut être réalisée avec des matériaux locaux, et même avec des outils de terrassement et une main d'œuvre artisanale.

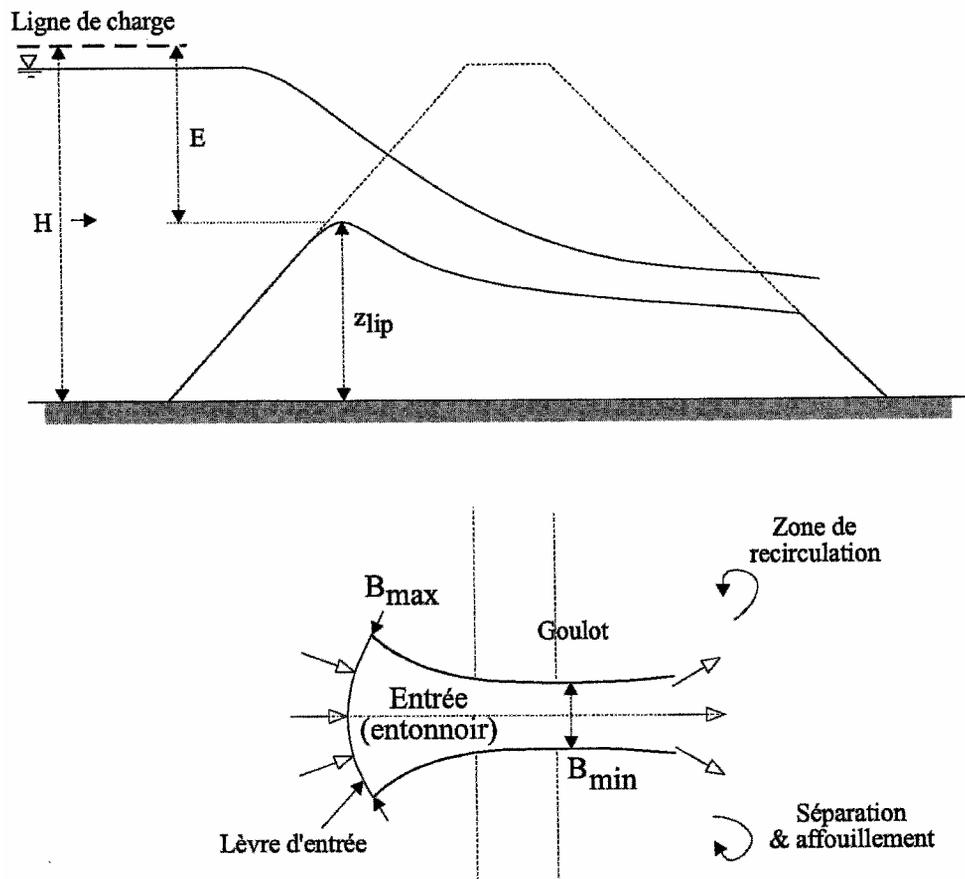


Figure 7 : Développement d'une brèche dans une digue en remblai : schéma.

9. C.a.d., la ligne de charge est pratiquement horizontale dans l'entonnoir de la brèche et dans le goulot.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier, tout particulièrement, le Professeur Colin Apelt (University of Queensland, Australie) pour ses conseils et avis, ainsi que toutes les personnes qui lui ont fourni des informations, parmi lesquelles Dr S. Coleman (University of Auckland, NZ), Dr M.R. Gourlay (University of Queensland, Australie), Dr J.H. Loveless (University of Bristol, GB).

NOTATION

B	largeur (m) de canal ;
B_{\max}	largeur (m) de lèvres mesurée perpendiculairement aux lignes de courant ;
B_{\min}	largeur (m) du goulot ;
C_D	coefficient adimensionnel de débit ;
D	hauteur interne (m) du goulot ;
d	hauteur d'eau (m) ;
d_c	profondeur d'eau critique (m) ;
d_0	hauteur d'eau (m) dans la plaine d'inondation en absence d'ouvrage, pour le débit de dimensionnement ;

E	charge spécifique (m) ;
E_0	charge spécifique (m) dans la plaine d'inondation en absence d'ouvrage, pour le débit de dimensionnement ;
g	accélération de la gravité (m/s^2) ;
H	charge (m) ;
L_{barrel}	longueur (m) du goulot ;
Q	débit (m^3/s) ;
Q_{des}	débit (m^3/s) de dimensionnement ;
S_0	pente du canal ;
t	temps (s) écoulé depuis l'ouverture de la brèche ;
z_{lip}	niveau du seuil (m) de la brèche, dans l'axe ;
Δz	profondeur d'excavation (m) ;
Δz_0	profondeur d'excavation (m) du goulot.

ABBREVIATIONS

M.E.L. Minimum Energy Loss ;
P.C.M. Pertes de Charge Minimales.

VOCABULAIRE

Anglais	Français
Afflux	Afflux
Barrel	Goulot
Channel	Canal
Culvert	Buse de drainage, Ponceau
Discharge	Débit
Inlet	Entrée
Minimum Energy Loss	Pertes de Charge Minimales
Specific Energy	Charge Spécifique
Outlet	Sortie
Throat	Goulot
Total Head	Charge, Charge Totale
Waterway	Canal, Canal de drainage

BIBLIOGRAPHIE

- APELT C.J. (1983). — « Hydraulics of Minimum Energy Culverts and Bridge Waterways ». *Australian Civil Engrg Trans.*, I.E.Aust., Vol. CE25, No. 2, pp. 89-95.
- APELT C.J. (1994). — « The Minimum Energy Loss Culvert ». — *Videocassette VHS colour*, Dept. of Civil Eng., University of Queensland, Australia, 18 minutes.
- APELT C.J. (2002). — « What has Fluid Mechanics got to do with it ? » *Aust. JI of Water Res.*, IEAust., Vol. 5, No. 2, pp. 123-136.
- BALLANCE M.H. (1951). — « The Roman Bridges of the Via Flaminia ». *Papers of the British School at Rome*, Vol. 19, pp. 78-117 & plates xiv to xix.
- CHANSON H. (1999). — « The Hydraulics of Open Channel Flows : An Introduction ». *Butterworth-Heinemann*, Oxford, UK, 1st edition.
- CHANSON H. (2000). — « Introducing Originality and Innovation in Engineering Teaching : the Hydraulic Design of Culverts ». *European Journal of Engineering Education*, Vol. 25, No. 4, pp. 377-391.
- CHANSON H. (2001). — « Teaching Hydraulic Design in an Australian Undergraduate Civil Engineering Curriculum ». *Jl of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 127, No. 12, pp. 1002-1008.
- CHANSON H. (2002). — « Hydraulics of a Large Culvert beneath the Roman Aqueduct of Nîmes ». *Jl of Irrigation and Drainage Engrg.*, ASCE, Vol. 128, No. 5, pp. 326-330.

- CHANSON H. (2003). — « History of Minimum Energy Loss Weirs and Culverts. 1960-2002 ». *Proc. 30th IAHR Biennial Congress*, Thessaloniki, Greece, J. Ganoulis and P. Prinos Ed., Vol. E, pp. 379-387.
- CHANSON H. (2004a). — « The Hydraulics of Open Channel Flows : An Introduction ». *Butterworth-Heinemann*, Oxford, UK, 2nd edition.
- CHANSON H. (2004b). — « Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments. Discussion ». *Jl of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 130, No. 4, pp. 371-374.
- COLEMAN S.E., ANDREWS D.P., WEBBY M.G. (2002). — « Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments ». *Jl of Hyd. Engrg.*, ASCE, Vol. 128, No. 9, pp. 829-838. Discussion : Vol. 130.
- COTTMAN N.H. (1976). — « Fivefold Increase Obtained in the Capacity of a Small Bridge using a Shaped Minimum Energy Subway ». *Aust. Road Res.*, Vol. 6, No. 4, pp. 42-45.
- COTTMAN N.H., and McKay G.R. (1990). — « Bridges and Culverts Reduced in Size and Cost by Use of Critical Flow Conditions ». *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, London, Part 1, Vol. 88, pp. 421-437. Discussion : 1992, Vol. 90, pp. 643-645.
- EVANS A.H. (1928). — « The Palace of Minos : a Comparative Account of the Successive Stages of the Early Cretan Civilization as Illustrated by the Discoveries at Knossos ». *Macmillan*, London, UK, Vol. II, Part 1, 390 pages & 19 plates.
- Federal Highway Administration (1985). — « Hydraulic design of Highway Culverts ». *Hydraulic Design Series No. 5*, Report No. FHWA-IP-85-15, US Federal Highway Administration, 253 pages.
- GORDON A.D. (1981). — « The Behaviour of Lagoon Inlets ». *Proc. 5th Australian Conf. Coastal and Ocean Eng.*, Perth WA, pp. 62-63.
- GORDON A.D. (1990). — « Coastal Lagoon Entrance Dynamics ». *Proc. 22nd Intl Conf Coastal Eng.*, Delft, The Netherlands, B.L. EDGE Ed., Vol. 3, Cahp. 218, pp. 2880-2893.
- HAMILL L. (1999). — « Bridge Hydraulics ». *E&FN Spon*, London, UK, 367 pages.
- LOVELESS J.H. (1984). — « A Comparison of the Performance of Standard and Novel Culvert Designs including the Effects of Sedimentation ». *Proc. 1st Intl Conf. Hydraulic Design in Water Resources Engineering : Channels and Channel Control Structures*, K.V.H. Smith Ed., Southampton, UK, Springer Verlag Publ., Vol. 1, pp. 183-193.
- LOWE S.A. (1970). — « Comparison of Energy Culverts to Standard Three Cell Box Culverts ». *Masters thesis*, University of Manitoba, Canada.
- McKAY, G.R. (1970). "Pavement Drainage." *Proc. 5th Aust. Road Res. Board Conf.*, Vol. 5, Part 4, pp. 305-326.
- McKAY, G.R. (1971). — « Design of Minimum Energy Culverts ». *Research Report*, Dept of Civil Eng., Univ. of Queensland, Brisbane, Australia, 29 pages & 7 plates.
- O'CONNOR C. (1993). — « Roman Bridges ». *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, 235 pages.
- VALLENTINE H.R. (1969). — « Applied Hydrodynamics ». *Butterworths*, London, UK, SI edition.

Site Internet

- CHANSON H. (2000). — « Hydraulics of Minimum Energy Loss (MEL) Culverts and Bridge Waterways ». Adresse Internet : (http://www.uq.edu.au/~e2hchans/mel_culv.html).