INTRODUCTION GENERALE

Le calcul des écoulements uniformes à surface libre ou en charge occupe une place importante dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien. Un écoulement est considéré comme étant uniforme lorsque ses caractéristiques sont invariables dans le temps et dans l'espace. Ces caractéristiques sont la profondeur h de l'écoulement appelée aussi hauteur normale, l'aire de la section mouillée A, la vitesse moyenne V de l'écoulement et le débit volume Q. D'un point de vue pratique, la constance de la vitesse V est généralement associée à celle de la vitesse moyenne; mais de façon plus rigoureuse, cela signifie que l'écoulement est caractérisé par une vitesse constante en tout point de son domaine. En d'autres termes, la distribution des vitesses dans chacune des sections transversales de l'écoulement est uniforme, correspondant à une couche limite pleinement développée; cet aspect du problème a été longuement étudié par plusieurs chercheurs (*Prandtl*, 1926; *Keulegan*, 1938; *Hama*, 1954; *Schlichting*, 1955; *Morris*, 1955; *Iwasa*, 1957). Bien que la condition d'un écoulement uniforme, dans le sens strict du terme, ne soit pratiquement jamais satisfaite, elle est cependant fréquemment admise lors du calcul des caractéristiques d'un écoulement en canaux et rivières (*Chow*, 1973). Cette approche simplifiée donne des résultats assez satisfaisants dans bon nombre de cas pratiques.

Les relations de calcul de la profondeur normale dans les canaux expriment de manière approximative la vitesse moyenne V sous l'hypothèse d'un régime turbulent. Ce régime doit être considéré non seulement comme étant turbulent, mais aussi comme étant rugueux en raison du fait que l'effet des forces dues à la viscosité est laissé hors considération. Les relations appliquées se présentent, en règle générale, sous la forme $V=CR_h^{\beta}J^{\gamma}$, où R_h est le rayon hydraulique, J est la pente de la ligne de charge, C est un paramètre qui traduit la résistance de l'écoulement et dépend de la vitesse moyenne V, de R_h, de la rugosité absolue ε des parois du canal, de la viscosité du liquide et de beaucoup d'autres facteurs. L'une des premières formules destinées au calcul de l'écoulement uniforme est probablement celle de *Chézy*, correspondant à $\beta=\gamma=1/2$. Le coefficient C de *Chézy* a été estimé par plusieurs auteurs (*Ganguillet* et *Kutter*, 1869; *Bazin*, 1897; *Powell*, 1950). Mais, la relation la plus largement utilisée pour les écoulements uniformes dans les canaux ouverts est celle de *Manning* (1891) en raison de sa forme simplifiée et aux résultats satisfaisants auxquels elle aboutit. Dans cette relation, $\beta=2/3$ et $\gamma=1/2$ tandis que $C=k=1/n$ où n est le coefficient de rugosité appelé aussi coefficient de *Manning*. La même forme de la relation ayant été introduite indépendamment par *Strickler* (1923), cette relation est souvent appelée formule de *Manning-Strickler*. Il n'existe aucune méthode exacte qui permet d'évaluer n. Évaluer n revient à estimer la résistance de l'écoulement dans un canal donné, ce qui nécessite beaucoup d'expérience et de pratique. Notons cependant que *Hager* (1987) a pu lier, à travers une relation fortement intéressante, le coefficient k et la rugosité absolue ε. Une autre relation qui servira de base à notre étude est celle de *Darcy-Weisbach,* initialement formulée par *Weisbach* (1845*)* et reprise par *Darcy* (1854) dans ses recherches expérimentales. Cette relation, développée pour les écoulements en conduites, se présente sous la forme $J = fV^2/(2gD)$ où f est le coefficient de frottement, D est le diamètre de la conduite et g est l'accélération de la pesanteur. Le coefficient de frottement f dépend à la fois de la rugosité relative ε/D et du nombre de *Reynolds* R. La nature du régime d'écoulement dans la conduite peut être examinée à travers la variation de $f=\phi(R,\varepsilon/D)$. Le graphique obtenu est communément appelé diagramme de *Stanton* (1914).

Le calcul du coefficient de frottement f peut ce faire par application de la formule de *Colebrook-White.* Celle-ci est applicable lorsque l'écoulement est en régime pratiquement lisse, de transition ou turbulent rugueux. Pour ce dernier régime d'écoulement, la relation de *Colebrook-White* mène à la relation de *Nikuradse,* en écrivant que le nombre de *Reynolds* $R \to \infty$. La relation de *Nikuradse* sera utilisée lors de notre développement théorique.

Bien que la relation de *Darcy-Weisbach* (1854, 1845) ait été développée pour le cas des conduites, elle est également applicable aux canaux ouverts, en remplaçant D par le diamètre hydraulique D_h.

Dans le cas le plus général, l'écoulement est régi par une fonction de six paramètres que l'on peut écrire sous la forme $\varphi(a,Q,J,\varepsilon,w,\nu)=0$, où :

- a est une dimension linéaire quelconque liée à l'écoulement ou au profil géométrique du canal considéré. Cette dimension linéaire peut être à titre d'exemple la profondeur h de l'écoulement, la largeur b d'un canal rectangulaire ou la petite base d'un trapèze, le diamètre D d'une conduite circulaire,…
- w est le paramètre de forme ou rapport d'aspect du profil liquide en écoulement, correspondant à $w=\eta=b/h$ pour le cas du canal rectangulaire ou trapézoïdal, à $w=\xi=h/D$ pour le cas du profil circulaire,...
- ν est la viscosité cinématique du liquide en écoulement.

En pratique, trois catégories de problèmes peuvent se poser. La première catégorie répond à un besoin de dimensionnement et consiste à rechercher la dimension linéaire a à partir des valeurs connues des cinq autres paramètres régissant l'écoulement. La relation fonctionnelle φ devient $a=\phi_a(Q,J,\varepsilon,w,\nu)$. A l'exception de la méthode dite "méthode *Larhyss*", la bibliographie montre qu'il n'existe aucune relation explicite susceptible de répondre à cette catégorie de problème lorsque l'écoulement est de nature lisse ou de transition. Ceci s'explique par l'impossibilité d'évaluer le nombre de *Reynolds* R, puisque celui-ci dépend de la dimension linéaire a recherchée. Le problème peut être résolu en s'appuyant sur un procédé itératif.

La méthode *Larhyss* (2002), développée par le laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, sera particulièrement exposée dans le chapitre III de la première partie.

Dans le domaine rugueux, pour lequel la dimension linéaire a est indépendante de *R*, l'application des relations de type *Manning-Strickler* (1891, 1923) donnent des résultats satisfaisants.

La deuxième catégorie de problème consiste à rechercher la valeur du débit volume Q tel que $Q=\varphi_Q(a,J,\varepsilon,w,\nu)$. Ce problème trouve sa solution, et de manière explicite, en combinant les relations de *Colebrook-White* et de *Darcy-Weisbach*, et ce quelle que soit la nature du régime d'écoulement.

La troisième catégorie de problème est celle qui consiste à évaluer le gradient de la perte de charge *J* tel que $J=\varphi_J(a,Q,\varepsilon,w,\nu)$. Pour ce cas, l'application des relations de type *Darcy-Weisbach* (1854, 1845) est suffisante.

Notre modeste contribution sera exclusivement consacrée à l'étude du régime d'écoulement permanent uniforme turbulent rugueux.

Dans cette étude, nous proposons d'établir une relation généralisée susceptible de répondre à la première catégorie de problème ci-dessus exposé. Il s'agit en fait d'exprimer de manière pratique la relation fonctionnelle φ_a. Cette généralisation est possible par la combinaison des relations de *Darcy-Weisbach* et de *Nikuradse*.

Pour atteindre cet objectif, nous proposons de subdiviser notre étude en deux parties principales.

- La première partie, intitulée *Formules usuelles et nouvelles de l'écoulement uniforme et leur corrélation*, se compose de trois chapitres qui présentent un état de connaissances sur les formules usuelles de l'écoulement uniforme, leur développement théorique et leur limite d'applicabilité avec une présentation particulière de la méthode *Larhyss* (2002). Une attention particulière est accordée à l'application de ces relations au cas de la conduite circulaire, profil largement utilisé dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien.
- La seconde partie, intitulée *Approche théorique au calcul de l'écoulement uniforme*, constitue notre modeste contribution au sujet traité. Cette partie est également composée de deux chapitres principaux, présentant respectivement notre développement théorique et sa vérification expérimentale. Celle-ci vise à étayer les relations théoriques que nous

avons proposé et dont les résultats ont été comparés aux données de la littérature (*Dupont*,1988; *Gali*, 2002).