

HYDRAULIQUE

générale

Armando
LENCASTRE


EYROLLES


SAFEGE

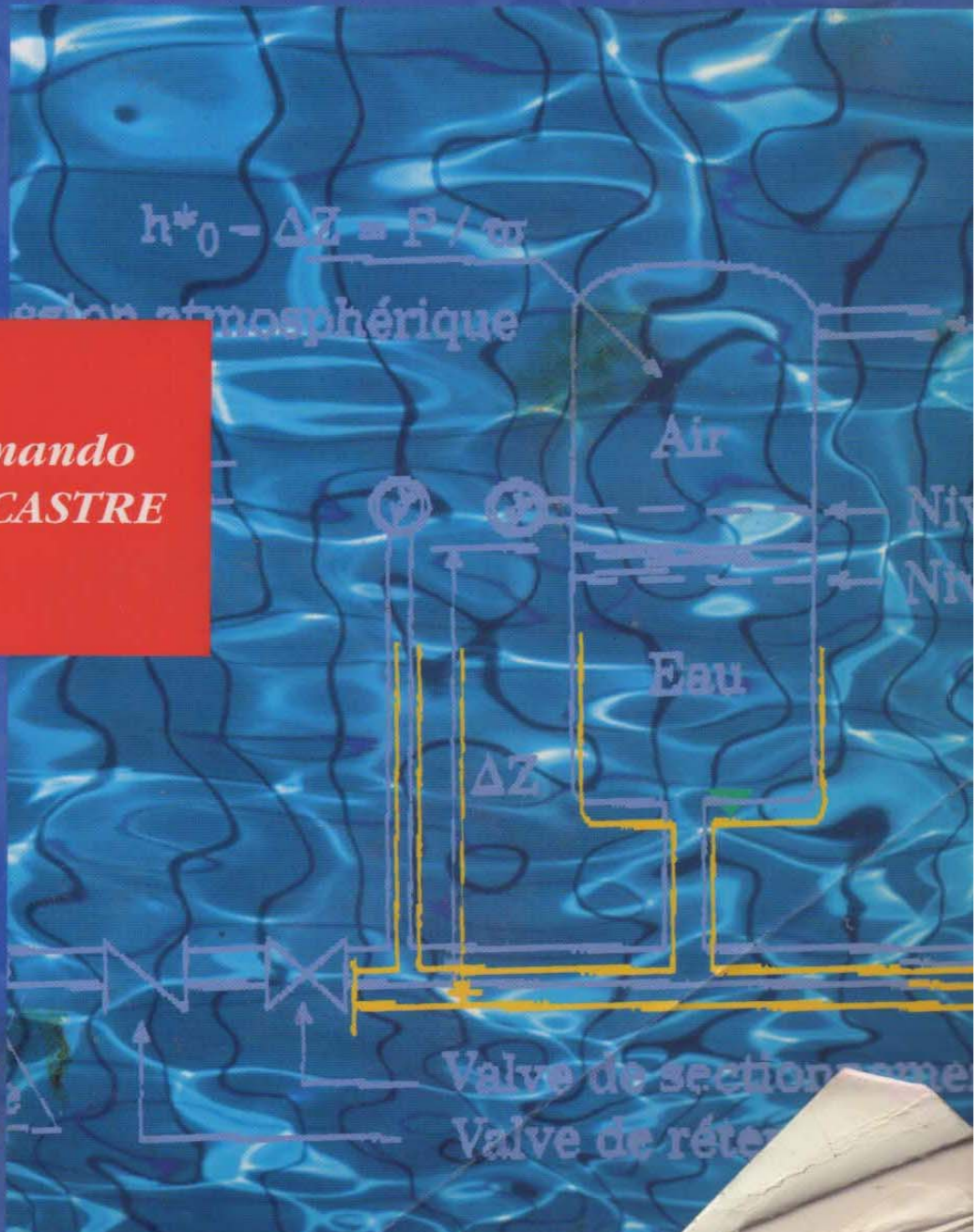


TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I – PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES LIQUIDES	25
A – <i>Constantes physiques</i>	25
1.1 – Définition. 1.2 – Poids et masse. 1.3 – Systèmes d'unités.	
1.4 – Système international d'unités – SI. 1.5 – Masse spécifique.	
1.6 – Poids spécifique ϖ . 1.7 – Densité. 1.8 – Coefficient de viscosité dynamique.	
1.9 – Coefficient de viscosité cinématique. 1.10 – Tension superficielle. Capillarité.	
1.11 – Pression. 1.12 – Module d'élasticité volumique. 1.13 – Célérité des ondes élastiques. 1.14 – Solubilité des gaz dans l'eau.	
1.15 – Tension de vapeur d'eau h_v .	
B – <i>Analyse dimensionnelle</i>	37
1.16 – Généralités. Paramètres géométriques. 1.17 – Principes de l'homogénéité.	
1.18 – Théorème des π ou de Vaschy-Buckingham.	
1.19 – Produits sans dimension d'usage courant en hydraulique.	
1.20 – Exemple.	
Bibliographie	44
CHAPITRE II – BASES THÉORIQUES DE L'HYDRAULIQUE.....	45
A – <i>Cinématique. Types d'écoulement</i>	45
2.1 – Exposé du problème. 2.2 – Mouvement laminaire et mouvement turbulent.	
2.3 – Trajectoire d'une particule. Variables de Lagrange.	
2.4 – Variables d'Euler. Valeurs moyennes de la vitesse, dans le temps.	
2.5 – Lignes de courant. 2.6 – Flux ou débit. Vitesse moyenne dans une section.	
2.7 – Équation de continuité. 2.8 – Équation d'état.	
2.9 – Le vecteur accélération dV / dt . Régime variable ou permanent – régime uniforme et non-uniforme.	
2.10 – Mouvement et déformation des liquides. 2.11 – Mouvements rotationnels et irrotationnels.	
B – <i>Dynamique. Équation générale du mouvement</i>	59
2.12 – Position du problème. 2.13 – État de tension en un point : tenseur des pressions P_{ij} ; pression hydrostatique p ; tension visqueuse τ_{ij} .	
2.14 – Variation de l'état de tension. 2.15 – Équation générale de Navier-Stokes.	
2.16 – Écoulements dans le champ de la gravité. 2.17 – Exemple. Équation de Poiseuille pour l'écoulement en tuyaux en régime laminaire.	
2.18 – Régime turbulent. Longueur de mélange. 2.19 – Équations d'Euler au long de la trajectoire.	

C – Énergie des écoulements. Théorème de Bernoulli	67
2.20 – Types d'énergie. 2.21 – Théorème de Bernoulli : énergie d'une particule le long de sa trajectoire. 2.22 – Ligne d'énergie et ligne piézométrique. 2.23 – Énergie ou charge dans une section d'écoulement. 2.24 – Application de l'équation de Bernoulli à un tube de courant. 2.25 – Énergie propre de la turbulence.	
D – Quantité de mouvement. Théorème d'Euler	75
2.26 – Quantité de mouvement. 2.27 – Théorème d'Euler. 2.28 – Application du théorème d'Euler à un tube de courant (écoulement permanent). 2.29 – Application du théorème d'Euler à une conduite coudée. 2.30 – Exemple.	
E – Établissement du mouvement	80
2.31 – Début de l'écoulement. Couche limite. 2.32 – Décollement de l'écoulement. 2.33 – Résistance des corps immergés. Sustentation.	
F – Écoulements irrotationnels	86
2.34 – Cas général. 2.35 – Écoulements dans l'espace. 2.36 – Le tourbillon. 2.37 – Écoulements plans ; utilisation des fonctions à variable complexe. 2.38 – Écoulements plans. Utilisation de la représentation conforme. 2.39 – Transformation de Joukowski. 2.40 – Profil aérodynamique de Joukowski. 2.41 – Écoulements plans. Méthode graphique.	
Bibliographie	103
CHAPITRE III – HYDROSTATIQUE	105
3.1 – Équations fondamentales. Fluide en repos soumis uniquement à l'action de la gravité. 3.2 – Distribution des pressions. 3.3 – Résultante des pressions sur des surfaces planes. 3.4 – Exemples. 3.5 – Résultante des pressions sur les surfaces rectangulaires ayant deux côtés horizontaux. 3.6 – Poussée sur des corps immergés : principe d'Archimède. 3.7 – Résultantes des pressions sur des surfaces courbes. 3.8 – Exemples. 3.9 – Équilibre d'un liquide soumis à d'autres champs de forces outre celui de la gravité. 3.10 – Équilibre des corps flottants.	
Bibliographie	119
CHAPITRE IV – ÉCOULEMENTS EN CHARGE. RÉGIME PERMANENT	121
A – Pertes de charge linéaires.....	121
4.1 – Expression générale. 4.2 – Nombre de Reynolds. Mouvement laminaire et mouvement turbulent. 4.3 – Distribution des vitesses. Film laminaire. 4.4 – Rugosité absolue et rugosité relative. 4.5 – Tuyaux lisses et tuyaux rugueux. 4.6 – Coefficient de perte de charge λ . Diagramme de Moody. 4.7 – Formules empiriques.	

4.8 – Compatibilité entre les formules empiriques et le coefficient de perte de charge λ (diagramme de Moody). 4.9 – Écoulements en tuyaux souples. 4.10 – Écoulement des fluides compressibles. 4.11 – Vieillessement des conduites. 4.12 – Choix de la formule à employer. 4.13 – Considérations économiques.	
B – Pertes de charge singulières	136
4.14 – Expression générale. Longueur équivalente de conduite. 4.15 – Pertes dans les élargissements brusques. 4.16 – Élargissements progressifs. Diffuseurs. 4.17 – Pertes dans les rétrécissements et les entrées. 4.18 – Pertes dans les vannes et les robinets. 4.19 – Pertes dans les coudes. 4.20 – Pertes dans les branchements et les bifurcations. 4.21 – Grilles à barreaux. 4.22 – Pertes dans les tôles perforées. 4.23 – Pertes dans les rainures et joints de dilatation. 4.24 – Singularités en série.	
C – Ligne de charge et ligne piézométrique	153
4.25 – Tracé de la ligne de charge et de la ligne piézométrique. 4.26 – Position de la ligne piézométrique par rapport à la conduite.	
D – Problèmes spéciaux	156
4.27 – Expressions générales. 4.28 – Exemples. 4.29 – Conduites en série. 4.30 – Réseaux ramifiés. 4.31 – Systèmes en parallèle. 4.32 – Cas de plusieurs réservoirs reliés entre eux. 4.33 – Systèmes complexes. Réseaux de conduites. 4.34 – Conduites avec débit constant et diamètre variable. 4.35 – Conduites de diamètre constant dans lesquelles le débit varie uniformément le long du parcours.	
Bibliographie	166
CHAPITRE V – ÉCOULEMENTS À SURFACE LIBRE – RÉGIME UNIFORME	167
A – Généralités	167
5.1 – Nombre de Reynolds et nombre de Froude. 5.2 – Types de mouvements. 5.3 – Distribution des pressions et des vitesses.	
B – Pertes de charge	170
5.4 – Formules du régime uniforme. 5.5 – Détermination de la profondeur normale : courbes des profondeurs normales. 5.6 – Sections de débit maximum. 5.7 – Sections complexes. 5.8 – Marge de sécurité dans les canaux.	
C – Stabilité des canaux non revêtus	176
5.9 – Critères de dimensionnement pour des matériaux non cohérents. 5.10 – Vitesses critiques. 5.11 – Tensions critiques. 5.12 – Exemple. 5.13 – Exemple. 5.14 – Section stable optimisée. 5.15 – Canaux avec végétation.	
Bibliographie	186

CHAPITRE VI – ÉCOULEMENTS À SURFACE LIBRE. RÉGIME PERMANENT ...	187
A – Équations générales	187
6.1 – Différents types de mouvements. 6.2 – Pertes de charge.	
6.3 – Énergie par rapport à un plan horizontal de référence.	
6.4 – La charge par rapport au fond. Charge spécifique.	
6.5 – Impulsion totale. 6.6 – Éléments critiques. 6.7 – Le facteur cinétique : nombre de Froude.	
B – Mouvement graduellement varié – Courbes de remous	195
6.8 – Équation générale du mouvement graduellement varié.	
6.9 – Formes des courbes de remous. 6.10 – Section de contrôle.	
6.11 – Méthode graphique. 6.12 – Méthode des différences finies.	
6.13 – Méthode de Bakhmeteff. 6.14 – Solution approchée de Bakhmeteff. 6.15 – Courbes de remous en cours d'eau naturels.	
C – Mouvement brusquement varié – Ressaut hydraulique	210
6.16 – Définitions. 6.17 – Détermination des profondeurs conjuguées du ressaut. 6.18 – Détermination de la perte d'énergie.	
6.19 – Localisation et longueur du ressaut. 6.20 – Ressaut submergé. 6.21 – Ressaut dans les canaux rectangulaires.	
D – Singularités dans les canaux.....	216
6.22 – Pertes type Borda – Formule d'Escande. 6.23 – Passage d'un réservoir à un canal. 6.24 – Passage d'un canal à un réservoir.	
6.25 – Surélévation du fond. 6.26 – Rétrécissements localisés : piles de ponts. 6.27 – Rétrécissement long. 6.28 – Changements brusques de pente. 6.29 – Chutes brusques à la fin d'un canal.	
6.30 – Écoulements dans les courbes.	
E – Déversoirs de crues.....	233
6.31 – Généralités. 6.32 – Déversoirs à seuil épais et parement d'aval adapté à la face inférieure de la nappe, type WES (<i>Waterways Experiment Station</i>). 6.33 – Seuils rectilignes bas.	
6.34 – Distribution des pressions sur le parement d'amont. 6.35 – Seuils circulaires en plan – Déversoirs en puits. 6.36 – Coefficient de contraction, dans les déversoirs avec piles.	
F – Dissipation d'énergie	244
6.37 – Généralités. 6.38 – Bassins de dissipation par ressaut hydraulique. 6.39 – Bassins de dissipation par rouleau (<i>roller bucket</i>). 6.40 – Bassins de dissipation d'impact. 6.41 – Macrorugosités.	
Bibliographie	254

CHAPITRE VII – ÉCOULEMENTS EN MILIEUX POREUX	255
A – <i>Définitions et lois générales</i>	<i>255</i>
7.1 – Caractéristiques des milieux poreux. 7.2 – L'eau dans les sols. Classification des nappes aquifères. 7.3 – Emmagasinement spécifique. Coefficient d'emmagasinement. Cession spécifique. 7.4 – Loi de Darcy. 7.5 – Conductivité hydraulique (perméabilité). Perméabilité intrinsèque. 7.6 – Transmissivité. 7.7 – Équation de Darcy généralisée. 7.8 – Écoulements à surface libre.	
B – <i>Régime permanent</i>	<i>267</i>
7.9 – Écoulements dans des fossés. 7.10 – Puits complets en nappes aquifères confinées. 7.11 – Puits complets en nappes aquifères confinées avec écoulement parallèle superposé. 7.12 – Puits complets en nappes phréatiques. 7.13 – Puits à pénétration partielle. 7.14 – Influence de la surface d'alimentation du puits. 7.15 – Groupe de puits complets. Influences réciproques. 7.16 – Puits en nappes aquifères finies. Méthode des images. 7.17 – Tranchée drainante de longueur finie. 7.18 – Tranchées drainantes radiales. 7.19 – Drain horizontal indéfini. 7.20 – Captage à drains radiaux.	
C – <i>Régime variable</i>	<i>284</i>
7.21 – Remarque préliminaire. 7.22 – Équations de Théis. 7.23 – Formule simplifiée de Jacob. 7.24 – Courbe de récupération. 7.25 – Rayon d'action d'un puits.	
D – <i>Drainage des terrains</i>	<i>288</i>
7.26 – Drainage des terrains en régime permanent. 7.27 – Drainage des terrains en régime variable. 7.28 – Mesures de conductivité hydraulique (perméabilité) aux effets du drainage.	
Bibliographie	<i>297</i>
CHAPITRE VIII – MESURES HYDRAULIQUES. ORIFICES ET DÉVERSOIRS	299
A – <i>Mesures des niveaux et des pressions</i>	<i>299</i>
8.1 – Appareils donnant directement la position de la surface liquide. 8.2 – Tubes piézométriques. 8.3 – Manomètres à tube en U. 8.4 – Manomètres différentiels. 8.5 – Règles pour l'installation des tubes piézométriques et des manomètres.	
B – <i>Mesure des vitesses</i>	<i>304</i>
8.6 – Flotteurs. 8.7 – Tubes de Pitot. 8.8 – Cylindre de Pitot. 8.9 – Sphère de Pitot. 8.10 – Moulinets. 8.11 – Courantographes. 8.12 – Mesure de la vitesse moyenne dans une section.	
C – <i>Mesure des débits dans les conduites en charge</i>	<i>309</i>
8.13 – Méthodes volumétriques. 8.14 – Appareils déprimogènes.	

8.15 – Compteurs mécaniques. **8.16** – Compteurs électromagnétiques et ultrasoniques. **8.17** – Mesure des débits au moyen de coudes. **8.18** – Facteurs à considérer dans le choix d'un mesureur de débits pour les écoulements en charge.

D – Orifices 315

8.19 – Définitions. **8.20** – Orifices de dimensions faibles ; formule de Torricelli ; coefficients de contraction, de vitesse et de débit. **8.21** – Orifices de grandes dimensions. **8.22** – Orifices à contraction incomplète. **8.23** – Vannes. **8.24** – Orifices partiellement ou complètement noyés. **8.25** – Ajutages. **8.26** – Aqueducs. **8.27** – Forme de la veine liquide. **8.28** – Mesure approchée des débits à partir de la forme du jet.

E – Déversoirs en mince paroi 324

8.29 – Définitions. **8.30** – Déversoirs rectangulaires sans contraction latérale : déversoir de Bazin. **8.31** – Conditions d'aération. **8.32** – Déversoir rectangulaire avec contraction latérale. **8.33** – Déversoir triangulaire. **8.34** – Déversoir trapézoïdal. Déversoir de Cipoletti. **8.35** – Déversoir circulaire. **8.36** – Déversoir avec courbe de débit à équation linéaire. Déversoir de Sutro. **8.37** – Choix d'un déversoir de mesure en mince paroi. **8.38** – Déversoir incliné. **8.39** – Déversoir oblique. **8.40** – Déversoir latéral.

F – Déversoirs à large seuil 333

8.41 – Généralités. **8.42** – Déversoir rectangulaire sans contraction latérale. **8.43** – Déversoir triangulaire. **8.44** – Chute libre dans un canal.

G – Déversoirs à seuil court 338

8.45 – Généralités. **8.46** – Déversoirs à seuil court dans des canaux rectangulaires sans contraction latérale.

H – Canaux Venturi. Mesureur Parshall 340

8.47 – Canaux Venturi longs. **8.48** – Mesureurs Parshall

Bibliographie 343

CHAPITRE IX – POMPES CENTRIFUGES 345

9.1 – Définition et classification. **9.2** – Débit. **9.3** – Hauteur d'élévation. **9.4** – Pression absolue minimale admissible à l'aspiration. **9.5** – Puissances et rendements. **9.6** – Vitesse de rotation. **9.7** – Diagramme en colline. Champ d'application. **9.8** – Vitesse spécifique. **9.9** – Limites d'aspiration. **9.10** – Courbes caractéristiques. Point de fonctionnement. **9.11** – Couplage de pompes en parallèle. **9.12** – Couplage de pompes en série. **9.13** – Couplage en série-parallèle. **9.14** – Conditions de démarrage. **9.15** – Conditions du moteur. **9.16** – Installation, exploitation et entretien.

9.17 – Avaries. **9.18** – Éléments à fournir au constructeur ou au vendeur pour le choix d'une pompe centrifuge.

Bibliographie..... 367

CHAPITRE X – RÉGIME TRANSITOIRE EN CHARGE. PROTECTION DES CONDUITES ÉLÉVATOIRES 369

A – Ondes élastiques. Coup de bélier 369

10.1 – Aspect qualitatif. **10.2** – Célérité de l'onde élastique. Influence de la conduite. **10.3** – Analyse théorique du coup de bélier. Équations d'Allievi. **10.4** – Manœuvres rapides. Formule de Joukowski. **10.5** – Manœuvres lentes. Paramètres de la conduite. **10.6** – Temps d'annulation du débit d'une pompe. **10.7** – Prise en considération des pertes de charge dans la conduite. **10.8** – Rupture de la veine liquide. **10.9** – Influence des poches d'air dans le coup de bélier. **10.10** – Méthodes générales d'analyse. Méthode de Bergeron.

B – Oscillation en masse. Cheminées d'équilibre 384

10.11 – Le coup de bélier quand existe une cheminée d'équilibre. **10.12** – Oscillation en masse dans le tronçon cheminée-réservoir. Équations fondamentales. **10.13** – Cheminées à section constante ($P = 0$; $R = 0$). Paramètres sans dimension. **10.14** – Cheminées d'équilibre à section constante. Effet de la perte de charge ($P \neq 0$; $R = 0$). **10.15** – Cheminées d'équilibre à section constante avec étranglement ($R \neq 0$).

C – Dispositifs de protection 394

10.16 – Généralités. **10.17** – Inertie des groupes et volant d'inertie. **10.18** – Cheminées d'équilibre. **10.19** – Réservoir d'air comprimé. **10.20** – Facteurs qui conditionnent les orifices des pertes de charge dans les cheminées d'équilibre et les réservoirs d'air comprimé. **10.21** – Bassins d'alimentation. **10.22** – Liaison en "by-pass" entre l'aspiration et la compression. **10.23** – Vannes spéciales. **10.24** – Dispositifs conjoints de protection. **10.25** – Dispositifs non conventionnels.

Bibliographie 407