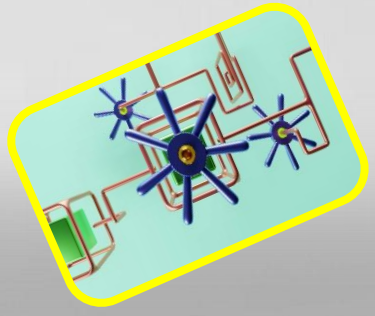
MÉCANIQUE APPLIQUÉE

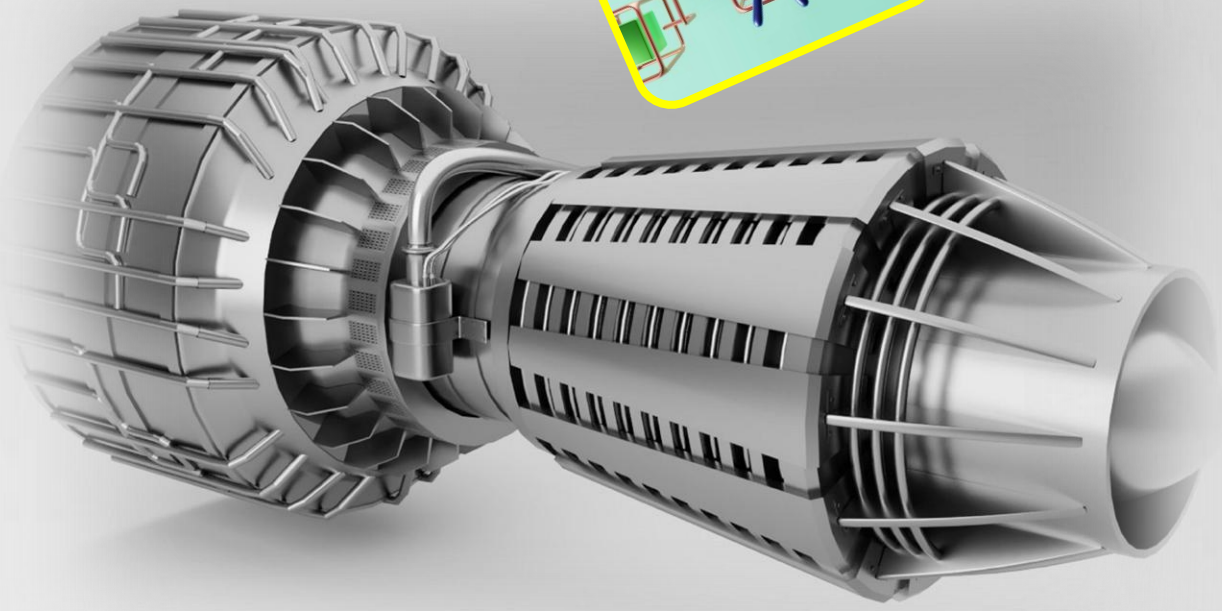
CONFORME AU PROGRAMME NATIONAL

3ème Année

EDITION 2025

Option Mécanique Générale





Éditions Donel C.
Direction Éditoriale et Conception Générale :
MURHULA BAZIKANGE M.
Pour contacts, mon site web :
https://murhulabazikange.com/

© 2025, Donel Consulting, Kin. RDC
Tous droits réservés.

Pour l'excellence de l'éducation en RDC,
Tous les manuels scolaires en un seul endroit,
sur ce site web :
https://manuels-scolaires-rdc.com/

Pour plus de détails, scannez ceci :

TABLE DE MATIERE

Préliminaires 1

Objectifs Pédagogiques du Cours 🎯 1

- Maîtriser les Principes Physiques Fondamentaux 1
- Analyser les Performances d'une Machine 2
- Comprendre la Technologie des Composants 2

Approche Didactique et Méthodologique 🔧 3

- La Théorie au Service de la Pratique 3
- Une Structure Modulaire et Progressive 3
- Le Carnet de Laboratoire : Votre Journal de Technicien 4

Contexte Industriel et Travaux Pratiques 🏭 5

- Les Pompes : Du Fleuve Congo au Robinet 5
- Les Ventilateurs : L'Air Vital de l'Industrie 5
- Les Compresseurs : La Force de l'Air 6

Chapitre 1 : Principes Énergétiques et Écoulements des Fluides 7

1.1. Les Formes d'Énergie en Mécanique des Fluides 7

- 1.1.1. L'Énergie Potentielle de Pesanteur (Ep) 7
- 1.1.2. L'Énergie Cinétique (Ec) 8
- 1.1.3. L'Énergie de Pression (Epr) 9
- 1.1.4. L'Énergie Mécanique Totale 9

1.2. L'Équation de Continuité et la Conservation du Débit 10

- 1.2.1. Débits Massique et Volumique 10
- 1.2.2. L'Équation de Continuité 11
- 1.2.3. Cas d'un Fluide Incompressible 11

1.3. Le Théorème de Bernoulli pour les Fluides Parfaits 12

- 1.3.1. Hypothèses : Le Fluide "Parfait" 12
- 1.3.2. L'Énoncé du Théorème 13
- 1.3.3. Interprétation et Applications 13

1.4. Notion de Pertes de Charge dans les Écoulements Réels 14

- 1.4.1. L'Équation de Bernoulli Généralisée 14
- 1.4.2. Les Pertes de Charge Régulières (ou Linéaires) 15
- 1.4.3. Les Pertes de Charge Singulières 15
- 1.4.4. Calcul de la Perte de Charge Totale 16

- Ressources Complémentaires 16
- Exercices d'Application 18

Chapitre 2 : Mesures et Techniques Expérimentales en Fluides 21

2.1. Mesure des Pressions : Manomètres et Capteurs 21

- 2.1.1. Le Manomètre à Tube en U 21
- 2.1.2. Le Manomètre Métallique (Tube de Bourdon) 22
- 2.1.3. Les Capteurs de Pression Électroniques 23

2.2. Mesure des Débits : Bacs Jaugés et Appareils Déprimogènes 24

- 2.2.1. La Méthode Directe : Bac Jaugé et Chronomètre 24
- 2.2.2. Les Appareils Déprimogènes 25

2.3. Mesure des Vitesses de Rotation et de Translation 26

- 2.3.1. Le Tachymètre de Contact 26
- 2.3.2. Le Tachymètre Optique (Stroboscope) 27

2.4. Mesure de la Puissance Électrique Absorbée 28

- 2.4.1. Rappels sur la Puissance en Régime Sinusoïdal 28
- 2.4.2. La Méthode des Deux Wattmètres en Triphasé 28

Exercices d'Application 30

Chapitre 3 : Principe et Constitution des Pompes Centrifuges 32

3.1. Classification des Pompes : Volumétriques et Turbomachines 32

- 3.1.1. Les Pompes Volumétriques : Le principe du volume capturé 32
- 3.1.2. Les Turbomachines : La force de la vitesse 33

3.2. Principe de la Conversion d'Énergie dans une Pompe Centrifuge 34

- 3.2.1. Acte 1 : De l'énergie mécanique à l'énergie cinétique 34
- 3.2.2. Acte 2 : De l'énergie cinétique à l'énergie de pression 35

3.3. Constitution Technologique : Roue, Volute et Diffuseur 36

- 3.3.1. La Roue (Impeller) : Le cœur du système 36
- 3.3.2. La Volute et le Diffuseur : Les convertisseurs de pression 37
- 3.3.3. Le Système d'Étanchéité : Contenir le fluide 38

3.4. Schéma de Principe d'une Installation de Pompage 39

- 3.4.1. Le Côté Aspiration (avant la pompe) 39
- 3.4.2. Le Côté Refoulement (après la pompe) 40
- Ressources Complémentaires 41
- 3.5.1. Analyse des Erreurs Fréquentes 41

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- 3.5.2. Exercices de Compréhension et de Raisonnement 41
- 3.5.3. Corrigés Détaillés 42

Chapitre 4 : Grandeurs Caractéristiques des Pompes 45

4.1. Hauteur Manométrique Totale (HMT) et Application de Bernoulli 45

- 4.1.1. Le Théorème de Bernoulli appliqué à une pompe 45
- 4.1.2. Expression et Calcul de la HMT 46
- 4.1.3. Étude de cas : Adduction d'eau pour une maison à Gombe 47
- 4.1.4. Ressources complémentaires 48
- 4.1.5. Exercices d'application 49

4.2. Puissances (Hydraulique, Absorbée) et Rendement 50

- 4.2.1. La Puissance Hydraulique (Ph) 50
- 4.2.2. La Puissance Absorbée (Pa) 50
- 4.2.3. Le Rendement (η) 51
- 4.2.4. Étude de cas : Coût énergétique du pompage à Lubumbashi 51
- 4.2.5. Ressources complémentaires 52
- 4.2.6. Exercices d'application 53

4.3. Le Phénomène de Cavitation et la Hauteur d'Aspiration (NPSH) 54

- 4.3.1. Qu'est-ce que la cavitation ? 54
- 4.3.2. Le NPSH : l'outil anti-cavitation 55
- 4.3.3. La Règle d'Or 56
- 4.3.4. Étude de cas : Pompage d'eau chaude à la Bralima 56
- 4.3.5. Exercices d'application 57

4.4. Lois de Similitude : Influence de la Vitesse de Rotation 57

- 4.4.1. Les trois lois fondamentales 58
- 4.4.2. Implications pratiques 58
- 4.4.3. Étude de cas : Régulation d'une pompe minière à Kolwezi 59
- 4.4.4. Exercices d'application 60

Chapitre 5 : Analyse du Fonctionnement et Sélection 61

5.1. Les Courbes Caractéristiques H(Q), P(Q) et η(Q) 61

- 5.1.1. La Courbe Hauteur-Débit H(Q) : La Force de la Pompe 61
- 5.1.2. La Courbe Puissance-Débit P(Q) : Le Coût Énergétique 62
- 5.1.3. La Courbe de Rendement η(Q) : L'Efficacité en Action 63
- 5.1.4. Lecture Combinée des Courbes Constructeur 64

5.2. Le Point de Fonctionnement : Intersection Courbe Pompe/Réseau 64
- 5.2.1. Comprendre la "Demande" du Réseau : La Courbe Caractéristique du Circuit 64
- 5.2.2. La Rencontre : Le Point de Fonctionnement Unique 65

5.3. Le Choix d'une Pompe pour une Application Donnée 66
- 5.3.1. Définir le Besoin : Le Point de Fonctionnement Désiré 66
- 5.3.2. La Méthode de Sélection en Trois Étapes 66
- 5.3.3. Étude de Cas : Alimentation en Eau d'un Centre de Santé à Mbandaka 67

5.4. Couplage des Pompes et Pompes Multicellulaires 68
- 5.4.1. Le Couplage en Série : Additionner les Hauteurs 68
- 5.4.2. Le Couplage en Parallèle : Additionner les Débits 69
- 5.4.3. Les Pompes Multicellulaires : La Série Intégrée 69

Ressources Complémentaires 70
- Questions de Compréhension 70
- Analyse des Erreurs Fréquentes 71
- Exercices d'Application 71
- Corrigés Détaillés 73

Chapitre 6 : Technologie et Classification des Ventilateurs 77

6.1. Principe de Fonctionnement et Applications 77
- Section d'exercices 6.1 79

6.2. Les Ventilateurs Centrifuges : Types de Roues 80
- Section d'exercices 6.2 83

6.3. Les Ventilateurs Hélicoïdaux (Axiaux) 83
- Section d'exercices 6.3 85

6.4. Soufflantes et Compresseurs Centrifuges (Notions) 86
- Section d'exercices 6.4 88

Chapitre 7 : Caractéristiques et Lois de Fonctionnement 90

7.1. Pressions en Aéraulique : Statique, Dynamique et Totale 90
- 7.1.1. Définitions Fondamentales 90
- 7.1.2. La Mesure des Pressions : Le Tube de Pitot 91
- 7.1.3. Unités de Pression en Aéraulique 93
- Exercices d'application : Section 7.1 93

7.2. Courbes Caractéristiques d'un Ventilateur 94
- 7.2.1. La Courbe Pression - Débit ($P = fQ$) 94

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- 7.2.2. La Courbe de Puissance Absorbée ($Pa = fQ$) 95
- 7.2.3. La Courbe de Rendement ($\eta = fQ$) 95
- 7.2.4. Lecture d'un Graphe de Caractéristiques 96
- Exercices d'application : Section 7.2 97

7.3. Lois des Vitesses et Similitude (Lois de Rateau) 98

- 7.3.1. Le Principe de Similitude 98
- 7.3.2. Les Trois Lois de Rateau 98
- 7.3.3. Implications Pratiques et Exemple 99
- Exercices d'application : Section 7.3 100

7.4. Point de Fonctionnement et Sélection 101

- 7.4.1. La Courbe Caractéristique du Réseau 101
- 7.4.2. Détermination Graphique du Point de Fonctionnement 102
- 7.4.3. Méthodologie de Sélection d'un Ventilateur 102
- Exercices d'application : Section 7.4 103

Chapitre 8 : Principes Thermodynamiques de la Compression des Gaz 105

8.1. Rappels sur les Lois des Gaz Parfaits 105

- 8.1.1. La Loi de Mariotte : Pression et Volume, une relation de proportionnalité inverse 105
- 8.1.2. La Loi de Gay-Lussac : Température et Pression, une relation directe 106
- 8.1.3. L'Équation d'État des Gaz Parfaits : La Synthèse 107

8.2. Les Transformations Thermodynamiques (Isotherme, Adiabatique) 107

- 8.2.1. La Transformation Isotherme : Le chemin de l'économie d'énergie 108
- 8.2.2. La Transformation Adiabatique : La réalité de la vitesse 108
- 8.2.3. La Transformation Polytropique : Le compromis réel 109

8.3. Travail de Compression Théorique 109

- 8.3.1. Travail de la Compression Isotherme 110
- 8.3.2. Travail de la Compression Adiabatique 110
- 8.3.3. Étude de Cas : Le coût énergétique de la chaleur 111

8.4. Le Cycle Théorique d'un Compresseur à Piston 112

- 8.4.1. Les Quatre Temps du Cycle Théorique Idéal 112
- 8.4.2. Le Diagramme de Clapeyron (P-V) 112
- 8.4.3. Le Travail du Cycle : L'Aire sur le Diagramme 113

Chapitre 9 : Le Compresseur à Piston Mono-étagé 114

9.1. Constitution et Technologie (Cylindre, Piston, Clapets) 114

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- 9.1.1. Le système bielle-manivelle : du rotatif au translatif 114
- 9.1.2. L'ensemble cylindre-piston : le cœur de la compression 115
- 9.1.3. Les clapets automatiques : les portes du fluide 116
- 9.1.4. Exercices d'application 116

9.2. Le Cycle Réel et le Diagramme Indiqué 117

- 9.2.1. L'écart par rapport au cycle théorique idéal 117
- 9.2.2. L'influence de l'espace mort (ou volume nuisible) 118
- 9.2.3. Les pertes de charge dues aux clapets 118
- 9.2.4. Les échanges thermiques avec les parois 119
- 9.2.5. Le diagramme indiqué : une photographie du travail réel 119
- 9.2.6. Exercices d'application 120

9.3. Rendements et Importance du Refroidissement 121

- 9.3.1. Définition des puissances et des rendements 121
- 9.3.2. Le rôle capital du refroidissement 122
- 9.3.3. Les technologies de refroidissement 123
- 9.3.4. Exercices d'application 124

9.4. Régulation et Démarrage du Compresseur 124

- 9.4.1. Le besoin de régulation du débit 125
- 9.4.2. La régulation par marche/arrêt (Start/Stop) 125
- 9.4.3. La régulation par "tout ou rien" (marche à vide) 125
- 9.4.4. Le défi du démarrage : vaincre l'inertie et la pression 126
- 9.4.5. Les dispositifs de mise à vide au démarrage 126
- 9.4.6. Exercices d'application 127

Chapitre 10 : Le Compresseur Multi-étagé et ses Auxiliaires 129

10.1. Intérêt de la Compression Étagée avec Refroidissement Intermédiaire 129

- 10.1.1. Le Défi Thermique de la Compression Mono-étagée 129
- 10.1.2. Le Principe : Fractionner l'Effort et Refroidir 130
- 10.1.3. Le Gain Énergétique Quantifié 130

10.2. Le Cycle Théorique du Compresseur Bi-étagé 131

- 10.2.1. Le Diagramme P-V : La Signature du Compresseur 131
- 10.2.2. Visualisation du Cycle Bi-étagé 131
- 10.2.3. L'Économie de Travail Révélée 132

10.3. Les Auxiliaires du Circuit d'Air : Filtres, Réservoir, Sécheurs 133

MURHULA BAZIKANGE M.
Directeur Editorial
+243 860 655 590

- 10.3.1. La Protection en Amont : Le Filtre à Air d'Aspiration 133
- 10.3.2. Le Poumon du Système : Le Réservoir d'Air Comprimé 134
- 10.3.3. La Qualité de l'Air : Le Traitement en Ligne 134

10.4. Lubrification et Maintenance des Compresseurs 135

- 10.4.1. Fonctions et Méthodes de Lubrification 136
- 10.4.2. La Maintenance Préventive : La Clé de la Fiabilité 136
- Exercices du Chapitre 10 138
- Corrigés et Pistes de Réflexion 139

Annexes 142

Diagrammes et Abaques 📊 142

- Utilisation de l'Abaque des Pertes de Charge Linéaires 142
- Comprendre le Diagramme de l'Air Humide (Psychrométrique) 144

Schémathèque des Installations 📋 146

- Symboles normalisés des composants hydrauliques et pneumatiques 146
- Installation de pompage pour surpression d'eau 147
- Installation de Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) simple flux 148
- Installation de production d'air comprimé 149

Guide de Diagnostic des Pannes 🔍 150

- Tableau de diagnostic des pannes courantes 150
- Méthodologie de dépannage structurée 151

Éditions Donel C.
Direction Éditoriale et Conception Générale :
MURHULA BAZIKANGE M.
Pour contacts, mon site web :
https://murhulabazikange.com/

© 2025, Donel Consulting, Kin. RDC
Tous droits réservés.

Pour l'excellence de l'éducation en RDC,
Tous les manuels scolaires en un seul endroit,
sur ce site web :
https://manuels-scolaires-rdc.com/

Pour plus de détails, scannez ceci :

Préliminaires

Objectifs Pédagogiques du Cours 🎯

Ce manuel a été conçu pour transformer votre manière de percevoir les machines qui nous entourent. Il ne s'agit pas d'un simple recueil de théories, mais d'une boîte à outils intellectuels destinée au futur technicien. À la fin de ce parcours, vous ne verrez plus une pompe, un ventilateur ou un compresseur comme une boîte noire, mais comme un système logique que vous pouvez analyser, comprendre et optimiser. L'ambition est de vous rendre autonome dans l'analyse fonctionnelle de ces équipements essentiels à toute activité industrielle, de l'agro-alimentaire à l'exploitation minière, en passant par la production d'énergie.

Maîtriser les Principes Physiques Fondamentaux

La performance d'une machine à fluide repose sur des lois physiques intangibles. L'objectif est de vous faire maîtriser les concepts clés, non pas pour la beauté de la formule, mais pour leur pouvoir explicatif.

1. **Le Principe de Conservation de la Masse** : Vous apprendrez à le traduire par l'équation de continuité. Concrètement, cela vous permettra de calculer comment la vitesse de l'eau change dans une tuyauterie de la REGIDESO dont le diamètre se réduit, et de comprendre pourquoi ce phénomène est crucial pour le design des pompes.

2. **Le Théorème de Bernoulli** : Ce principe fondamental lie la pression, la vitesse et l'altitude d'un fluide. Nous l'aborderons comme l'outil principal pour comprendre comment une pompe centrifuge augmente la pression d'un liquide ou comment un ventilateur crée un courant d'air. Vous serez capable d'estimer les variations de pression dans un circuit hydraulique simple.

3. **Les Pertes de Charge** : Un fluide ne s'écoule jamais sans résistance. Vous apprendrez à quantifier ces pertes d'énergie, qu'elles soient dues à la friction dans une longue conduite (pertes de charge linéaires) ou aux obstacles comme les coudes et les vannes (pertes de charge singulières). Cette compétence est indispensable pour dimensionner correctement une pompe qui doit vaincre ces résistances pour amener l'eau au sommet d'un château d'eau à Mbuji-Mayi.

4. **Les Lois des Gaz Parfaits et Réels** : Pour les compresseurs, la thermodynamique devient centrale. Vous appliquerez les lois des gaz

pour comprendre comment la compression augmente la température de l'air et comment le refroidissement intermédiaire entre les étages d'un compresseur permet d'économiser de l'énergie.

Analyser les Performances d'une Machine

Une machine n'est pas seulement définie par sa technologie, mais par ce qu'elle peut accomplir. L'objectif est de vous rendre capable de lire et d'interpréter le "bulletin de notes" d'une machine : ses courbes caractéristiques.

1. **Lecture des Courbes Caractéristiques** : Vous apprendrez à décoder les graphiques fournis par les constructeurs. Vous saurez identifier sur un même graphe l'évolution de la hauteur manométrique totale (HMT), de la puissance absorbée (P_a) et du rendement (η) en fonction du débit (Q).

2. **Détermination du Point de Fonctionnement** : La performance réelle d'une machine installée dans un circuit est le résultat d'une négociation entre ce que la machine peut offrir et ce que le circuit exige. Vous apprendrez à tracer la courbe caractéristique du réseau (la "demande") et à trouver son intersection avec la courbe de la pompe (l'"offre"). Ce point d'intersection, appelé point de fonctionnement, vous donnera le débit et la pression réels de l'installation.

3. **Analyse du Rendement et Optimisation Énergétique** : Vous saurez identifier la plage de fonctionnement où la machine opère avec le meilleur rendement. Cette compétence est cruciale, car faire fonctionner une machine loin de son point de rendement optimal entraîne un gaspillage d'énergie et une usure prématurée. Vous serez en mesure de justifier le remplacement d'une machine inadaptée par un modèle plus efficient, en calculant les économies d'énergie potentielles pour une usine de textile à Kinshasa.

Comprendre la Technologie des Composants

Savoir comment une machine fonctionne de l'intérieur est la clé pour en assurer la maintenance et le dépannage.

1. **Identification des Composants Clés** : Pour chaque type de machine, vous serez capable de nommer, localiser et expliquer le rôle de chaque pièce maîtresse. Par exemple, pour une pompe centrifuge, vous distinguerez la roue (ou impulseur), la volute, l'arbre, les

garnitures d'étanchéité et les roulements. Pour un compresseur à piston, vous identifierez le cylindre, le piston, les segments, la bielle, le vilebrequin et les clapets.

2. **Relation entre Technologie et Performance** : Vous comprendrez pourquoi une pompe à engrenages est utilisée pour des huiles visqueuses et une pompe centrifuge pour de grands débits d'eau. Vous apprendrez comment la forme des aubes d'un ventilateur (radiales, inclinées vers l'avant ou vers l'arrière) influence sa courbe de pression et son niveau sonore, un critère important pour la ventilation des bureaux de la GECAMINES à Lubumbashi.

Approche Didactique et Méthodologique 🔧

Ce manuel est conçu comme un compagnon d'apprentissage. Sa structure a été pensée pour vous guider pas à pas, en s'assurant que chaque nouvelle connaissance est solidement ancrée sur la précédente. L'objectif n'est pas de vous faire mémoriser des faits, mais de construire une véritable compétence technique.

La Théorie au Service de la Pratique

Nous refusons l'idée d'une théorie abstraite et déconnectée. Chaque loi physique, chaque formule mathématique est introduite avec un seul but : résoudre un problème concret lié à une machine.

Par exemple, le concept de la puissance hydraulique, $P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$, ne sera pas présenté comme une formule à apprendre par cœur. Nous partirons d'une situation réelle : "Quelle puissance une pompe doit-elle fournir à l'eau pour élever un débit Q de 10 mètres cubes par heure à une hauteur H de 20 mètres ?". La formule devient alors la réponse logique à une question pratique. Vous apprendrez à calculer cette puissance en Watts, puis à comprendre que la puissance que vous devrez fournir à l'arbre de la pompe sera supérieure, à cause du rendement de la machine. Cette approche transforme une équation en un outil de dimensionnement.

Une Structure Modulaire et Progressive

Pour éviter la confusion, chaque grande famille de machines (pompes, ventilateurs, compresseurs) est traitée dans un module indépendant et complet. Chaque module suit une progression logique et identique :

1. **Principes de Fonctionnement** : Nous commençons toujours par le "pourquoi". Quel phénomène physique est exploité pour transférer de

l'énergie au fluide ? C'est ici que les concepts fondamentaux (Bernoulli, thermodynamique) sont appliqués.

2. **Technologie et Classification** : Une fois le principe compris, nous explorons le "comment". Nous ouvrons la machine pour en découvrir les différentes technologies. Vous apprendrez à classer les machines (par exemple, pompes volumétriques vs pompes centrifuges) et à comprendre les avantages et inconvénients de chaque technologie.

3. **Analyse des Performances** : Armé de la connaissance du principe et de la technologie, vous apprendrez à quantifier la performance. C'est la section des courbes caractéristiques, du point de fonctionnement, du calcul de rendement et de la puissance.

4. **Critères de Sélection et Maintenance** : Enfin, nous abordons les aspects les plus pratiques. Comment choisir la bonne machine pour une application donnée ? Quels sont les signes d'usure ? Quelles sont les opérations de maintenance préventive à effectuer pour garantir une longue durée de vie ?

Le Carnet de Laboratoire : Votre Journal de Technicien

La connaissance théorique est volatile si elle n'est pas validée par l'expérience. Les séances de travaux pratiques (TP) sont le cœur de votre apprentissage. Le carnet de laboratoire n'est pas un simple cahier de brouillon, mais le témoin de votre démarche scientifique. Pour chaque manipulation, il devra contenir :

1. **L'Objectif** : Une phrase claire et concise décrivant ce que vous cherchez à mesurer ou à vérifier.

2. **Le Schéma de l'Installation** : Un dessin clair du montage expérimental, avec tous les appareils de mesure (manomètre, débitmètre, wattmètre) correctement positionnés et identifiés.

3. **Le Tableau de Mesures** : Un tableau propre et bien organisé où vous consignerez vos relevés bruts. Les unités doivent être systématiquement indiquées pour chaque grandeur mesurée.

4. **L'Exploitation des Résultats** : C'est la partie la plus importante. Vous y tracerez les courbes (par exemple, HMT en fonction de Q), calculerez les grandeurs dérivées (rendement, puissance hydraulique) et comparerez vos résultats aux données théoriques ou du constructeur.

5. **La Conclusion** : Vous y interpréterez vos résultats. L'objectif a-t-il été atteint ? Les résultats sont-ils cohérents ? Quelles sont les sources d'erreurs possibles ? Une conclusion bien rédigée prouve que vous avez compris l'expérience au-delà de la simple exécution de mesures.

Contexte Industriel et Travaux Pratiques

La pertinence de ce cours se mesure à sa capacité à vous préparer aux défis techniques que vous rencontrerez dans le contexte industriel de la République Démocratique du Congo. Chaque exemple, chaque étude de cas est pensée pour refléter des situations réelles, des problèmes concrets que des techniciens et ingénieurs résolvent chaque jour à travers le pays.

Les Pompes : Du Fleuve Congo au Robinet

L'eau est une ressource abondante en RDC, mais sa maîtrise est un enjeu technique majeur. L'étude des pompes sera directement illustrée par les systèmes de la REGIDESO.

- **Étude de cas 1 : Station de pompage de N'Djili à Kinshasa.** Nous analyserons le défi de prélever l'eau du fleuve, de la traiter, puis de la pomper à travers un vaste réseau de distribution. Vous apprendrez à calculer la hauteur manométrique totale nécessaire pour vaincre non seulement la différence d'altitude entre la station et les quartiers les plus élevés de la ville, mais aussi les pertes de charge dans des kilomètres de conduites.
- **Étude de cas 2 : Exhaure minière dans le Haut-Katanga.** Dans une mine à ciel ouvert ou souterraine, l'infiltration d'eau est un problème constant. Des pompes d'exhaure, souvent de très grande puissance, fonctionnent en continu pour maintenir les chantiers au sec. Nous étudierons les contraintes spécifiques de ces pompes : elles doivent être robustes, résistantes à l'abrasion (eau chargée de particules) et capables de fonctionner dans des conditions difficiles. Vous apprendrez pourquoi le choix d'une pompe avec une roue ouverte ou semi-ouverte est souvent pertinent dans ce contexte.

Les Ventilateurs : L'Air Vital de l'Industrie

Le mouvement de l'air est tout aussi crucial que celui de l'eau. Des mines aux plantations, les ventilateurs sont des poumons artificiels indispensables.

- **Étude de cas 3 : Ventilation d'une mine souterraine.** La sécurité et la productivité d'une mine souterraine dépendent de son système

de ventilation. Des ventilateurs principaux, installés en surface, injectent de l'air frais dans un réseau complexe de galeries pour diluer les gaz toxiques (grisou), évacuer la poussière et contrôler la température. Nous utiliserons ce contexte pour comprendre la notion de "perte de charge d'une mine" et comment on peut associer des ventilateurs en série ou en parallèle pour adapter le débit d'air aux besoins de l'exploitation.

- **Étude de cas 4 : Séchage du café dans le Kivu.** Après la récolte, les grains de café doivent être séchés pour atteindre un taux d'humidité précis. Des installations de séchage utilisent de grands ventilateurs pour forcer le passage d'un air (parfois légèrement chauffé) à travers une couche de grains. Vous apprendrez à calculer le débit d'air nécessaire en fonction de la quantité d'eau à évaporer, et à comprendre comment un bon dimensionnement du ventilateur peut accélérer le processus de séchage et améliorer la qualité du produit final.

Les Compresseurs : La Force de l'Air

L'air comprimé est souvent considéré comme le "quatrième fluide" de l'industrie, après l'électricité, l'eau et le gaz naturel. Sa production et sa gestion sont au cœur de nombreuses activités.

- **Étude de cas 5 : L'atelier de maintenance de la SNCC à Lubumbashi.** Imaginez un grand atelier où l'on répare des locomotives. L'air comprimé y est omniprésent : pour actionner les clés à chocs qui démontent des boulons de plusieurs centimètres de diamètre, pour alimenter les pistolets à peinture, pour les systèmes de sablage qui nettoient les pièces métalliques avant réparation, et pour actionner les freins des trains lors des tests. Nous analyserons le schéma d'un réseau d'air comprimé, depuis le compresseur central (souvent un compresseur à vis de grande capacité), en passant par le réservoir de stockage, les sécheurs et les filtres, jusqu'aux points d'utilisation.
- **Étude de cas 6 : Le garage automobile de Matete.** À une échelle plus modeste, le compresseur à piston est le roi du garage. Il sert à gonfler les pneus, à alimenter les ponts élévateurs pneumatiques et à utiliser divers outils. Ce sera l'occasion d'étudier le fonctionnement d'un compresseur alternatif, de comprendre le rôle du réservoir pour lisser la consommation et d'analyser l'importance de purger régulièrement l'eau qui se condense dans le réservoir pour éviter la corrosion des outils.

Chapitre 1 : Principes Énergétiques et Écoulements des Fluides

Avec l'eau qui coule d'un robinet, le vent qui souffle dans les arbres ou le sang qui circule dans les veines, les fluides en mouvement sont partout. Comprendre les lois qui gouvernent ces écoulements est essentiel, que ce soit pour concevoir un barrage hydroélectrique sur le fleuve Congo ou pour optimiser le réseau d'adduction d'eau d'une ville comme Matadi.

Ce chapitre établit le vocabulaire et les principes fondamentaux. Il vous donnera les outils pour analyser un fluide en mouvement, non pas comme un phénomène magique, mais comme un système physique prévisible, régi par la conservation de la masse et de l'énergie. Chaque équation est une clé pour décoder le comportement de la matière fluide.

1.1. Les Formes d'Énergie en Mécanique des Fluides

Un fluide en mouvement transporte de l'énergie. Pour un ingénieur ou un physicien, quantifier cette énergie est la première étape avant de pouvoir la manipuler. En mécanique des fluides, nous nous concentrons sur trois formes d'énergie qui, additionnées, constituent l'énergie mécanique totale d'une particule de fluide.

1.1.1. L'Énergie Potentielle de Pesanteur (E_p)

L'énergie potentielle est l'énergie qu'un objet possède en raison de sa position dans un champ de gravité. Plus un objet est haut, plus son énergie potentielle est grande. Imaginez une mangue suspendue à une branche ; elle possède une énergie potentielle qui se transformera en énergie de mouvement (énergie cinétique) si elle tombe.

Pour un fluide, c'est le même principe. L'eau au sommet d'une chute ou dans un château d'eau possède une énergie potentielle importante.

La formule pour calculer l'énergie potentielle d'une masse m de fluide située à une altitude z par rapport à un niveau de référence est :

$$E_p = m \cdot g \cdot z$$

Où :

- E_p est l'énergie potentielle, exprimée en Joules (J).
- m est la masse du fluide, en kilogrammes (kg).
- g est l'accélération de la pesanteur, environ $9.81\ m/s^2$ sur Terre.

- z est l'altitude par rapport à un point de référence, en mètres (m).

En mécanique des fluides, il est plus pratique de parler d'énergie par unité de masse, par unité de volume ou par unité de poids. L'énergie potentielle par unité de poids, souvent appelée **hauteur potentielle** ou **hauteur géométrique**, est particulièrement utile. Elle s'obtient en divisant E_p par le poids $m \cdot g$:

$$\frac{E_p}{m \cdot g} = z$$

Cette valeur, simplement l'altitude z, est exprimée en mètres. Elle représente la contribution de l'altitude à l'énergie totale du fluide.

1.1.2. L'Énergie Cinétique (E_c)

L'énergie cinétique est l'énergie associée au mouvement. Un objet immobile a une énergie cinétique nulle. Dès qu'il se déplace, il possède une énergie cinétique qui dépend de sa masse et de la vitesse de son déplacement. Un camion lancé à pleine vitesse sur la route nationale N1 a une énergie cinétique bien plus grande qu'un cycliste se déplaçant lentement.

Pour une masse m de fluide se déplaçant à une vitesse v, l'énergie cinétique est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Où :

- E_c est l'énergie cinétique, en Joules (J).
- m est la masse du fluide, en kilogrammes (kg).
- v est la vitesse du fluide, en mètres par seconde (m/s).

Comme pour l'énergie potentielle, nous pouvons exprimer l'énergie cinétique par unité de poids. Cette grandeur est appelée **hauteur cinétique** ou **hauteur dynamique**. Elle s'obtient en divisant E_c par le poids $m \cdot g$:

$$\frac{E_c}{m \cdot g} = \frac{\frac{1}{2} m \cdot v^2}{m \cdot g} = \frac{v^2}{2g}$$

Cette hauteur, exprimée en mètres, représente la contribution de la vitesse à l'énergie totale du fluide.

1.1.3. L'Énergie de Pression (E_{pr})

C'est la forme d'énergie la plus spécifique aux fluides. Elle représente le travail que les forces de pression exercent sur le fluide pour le faire avancer. Imaginez une seringue remplie d'eau. Pour expulser l'eau, le piston doit exercer une force sur le liquide. Cette force, appliquée sur la surface du liquide, crée une pression. L'énergie associée à cette pression est l'énergie de pression.

Elle est définie comme le produit de la pression P par le volume V du fluide :

$$E_{pr} = P \cdot V$$

Pour rendre cette énergie comparable aux autres, nous utilisons la masse volumique ρ, définie par $\rho = m/V$, ce qui donne $V = m/\rho$. En substituant dans l'équation :

$$E_{pr} = P \cdot \frac{m}{\rho}$$

Où :

- E_{pr} est l'énergie de pression, en Joules (J).
- P est la pression du fluide, en Pascals (Pa).
- m est la masse du fluide, en kilogrammes (kg).
- ρ est la masse volumique du fluide, en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3).

Enfin, exprimons cette énergie par unité de poids. Cette grandeur est la **hauteur de pression** ou **hauteur piézométrique**.

$$\frac{E_{pr}}{m \cdot g} = \frac{P \cdot \frac{m}{\rho}}{m \cdot g} = \frac{P}{\rho g}$$

Cette hauteur, également en mètres, représente la contribution de la pression à l'énergie totale du fluide.

1.1.4. L'Énergie Mécanique Totale

L'énergie mécanique totale d'une particule de fluide est simplement la somme de ces trois formes d'énergie. En exprimant chaque composante sous forme de "hauteur" (énergie par unité de poids), nous obtenons une grandeur homogène, exprimée en mètres, appelée **charge totale** ou **hauteur manométrique totale**, notée H.

H = Hauteur géométrique + Hauteur de pression + Hauteur cinétique

$$H = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}$$

Cette équation est l'une des plus importantes de la mécanique des fluides. Elle nous dit que l'énergie totale d'un fluide en un point donné est la somme de son altitude, de sa pression et de sa vitesse (au carré). Ces trois termes sont interchangeables : l'énergie peut se transformer d'une forme à l'autre. C'est ce que nous allons explorer avec le théorème de Bernoulli.

1.2. L'Équation de Continuité et la Conservation du Débit

Avant d'étudier la conservation de l'énergie, il est indispensable de comprendre un principe encore plus fondamental : la conservation de la masse. Dans un tuyau, une rivière ou une artère, la matière ne disparaît pas et n'apparaît pas spontanément. Cette évidence est la base de l'équation de continuité.

1.2.1. Débits Massique et Volumique

Pour quantifier la quantité de fluide qui s'écoule, on utilise deux concepts clés :

1. **Le Débit Volumique (Q_v)** : C'est le volume de fluide qui traverse une section donnée par unité de temps. Si un seau de 10 litres se remplit en 5 secondes sous un robinet, le débit volumique est de 2 litres par seconde. L'unité internationale est le mètre cube par seconde (m^3/s).

   La formule est :

   $$Q_v = A \cdot v$$

   Où :

   - A est l'aire de la section transversale de l'écoulement (en m^2).
   - v est la vitesse moyenne du fluide à travers cette section (en m/s).

2. **Le Débit Massique (Q_m)** : C'est la masse de fluide qui traverse une section donnée par unité de temps. L'unité internationale est le kilogramme par seconde (kg/s).

   Il est lié au débit volumique par la masse volumique ρ du fluide :

$$Q_m = \rho \cdot Q_v = \rho \cdot A \cdot v$$

1.2.2. L'Équation de Continuité

Considérons un tube ou une conduite où s'écoule un fluide. Prenons deux sections transversales, la section 1 (entrée) et la section 2 (sortie).

Le principe de conservation de la masse nous dit que, pour un écoulement stable (dit "permanent"), la masse de fluide qui entre dans le tube par la section 1 pendant un certain temps est égale à la masse qui en sort par la section 2 pendant le même temps. Il n'y a ni accumulation ni fuite de matière à l'intérieur du tube.

Mathématiquement, cela se traduit par :

$$Q_{m1} = Q_{m2}$$

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2$$

Cette relation est l'**équation de continuité** dans sa forme la plus générale. Elle est toujours vraie, que le fluide soit compressible (comme l'air) ou incompressible (comme l'eau), et que la section du tube change ou non.

1.2.3. Cas d'un Fluide Incompressible

La plupart des liquides, comme l'eau, l'huile ou le carburant, peuvent être considérés comme incompressibles dans des conditions normales. Cela signifie que leur masse volumique ρ ne varie pas de manière significative avec la pression.

Pour un fluide incompressible, on a donc $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. L'équation de continuité se simplifie alors grandement :

On peut diviser par ρ de chaque côté :

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Ou, de manière équivalente :

$$Q_{v1} = Q_{v2} = \text{constante}$$

Cette équation simple a des conséquences profondes : **pour un fluide incompressible, le produit de l'aire de la section par la vitesse est constant tout au long de l'écoulement.**

Cela explique un phénomène que chacun a pu observer :

- **Le tuyau d'arrosage** : Si vous pincez l'extrémité d'un tuyau d'arrosage, vous diminuez l'aire de la section de sortie (A_2). Pour que le produit $A \cdot v$ reste constant, la vitesse de sortie de l'eau (v_2) doit augmenter de manière spectaculaire.
- **Les rivières** : Dans une section large et profonde du fleuve Congo, l'eau s'écoule lentement. L'aire A est grande, donc la vitesse v est faible. En revanche, lorsque le fleuve s'engouffre dans des gorges étroites près d'Inga, l'aire A diminue drastiquement, et la vitesse v de l'eau devient très élevée, créant des rapides puissants.

L'équation de continuité est un outil de calcul puissant pour déterminer la vitesse d'un fluide en n'importe quel point d'une conduite, à condition de connaître la géométrie de la conduite et la vitesse en un autre point.

1.3. Le Théorème de Bernoulli pour les Fluides Parfaits

Nous avons vu que la masse se conserve (équation de continuité) et nous avons défini les différentes formes d'énergie. Le théorème de Bernoulli relie ces deux aspects en décrivant comment l'énergie se conserve et se transforme le long d'un écoulement.

1.3.1. Hypothèses : Le Fluide "Parfait"

Le théorème de Bernoulli, dans sa forme la plus simple, ne s'applique pas à n'importe quelle situation. Il repose sur un modèle idéalisé de l'écoulement, celui d'un **fluide parfait**. Un fluide est dit parfait s'il respecte deux conditions strictes :

1. **Il est incompressible** : Sa masse volumique ρ est constante. Nous avons déjà utilisé cette hypothèse pour simplifier l'équation de continuité.
2. **Il est non visqueux** : Il n'y a aucune force de frottement. Ni entre les particules de fluide elles-mêmes (viscosité), ni entre le fluide et les parois de la conduite. C'est comme imaginer un bloc qui glisse sur une surface sans le moindre frottement.

Dans la réalité, aucun fluide n'est parfaitement non visqueux. Cependant, pour de nombreux cas pratiques (écoulements rapides dans des tuyaux lisses, aérodynamique), cette simplification donne des résultats très proches de la réalité et permet de comprendre des phénomènes fondamentaux.

1.3.2. L'Énoncé du Théorème

Le théorème de Bernoulli est une reformulation du principe de conservation de l'énergie appliquée à un fluide parfait en écoulement permanent.

Il énonce que **le long d'une ligne de courant, la charge totale H reste constante.**

Considérons deux points, 1 et 2, sur une même ligne de courant dans un écoulement de fluide parfait. Le théorème de Bernoulli s'écrit :

$$H_1 = H_2$$

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = \text{constante}$$

Chaque terme de cette équation représente une forme d'énergie par unité de poids (une "hauteur" en mètres). Le théorème nous dit que la somme des hauteurs géométrique, de pression et cinétique est la même en tout point de l'écoulement.

1.3.3. Interprétation et Applications

L'équation de Bernoulli révèle une relation d'échange entre la pression, la vitesse et l'altitude. Si l'un des termes augmente, un ou deux autres doivent diminuer pour que la somme reste constante.

Cas d'une conduite horizontale ($z_1 = z_2$) :

Si l'altitude ne change pas, l'équation se simplifie :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Cette relation est au cœur de l'**effet Venturi**. Considérons un rétrécissement dans la conduite.

- D'après l'équation de continuité ($A_1 v_1 = A_2 v_2$), si la section A_2 est plus petite que A_1, alors la vitesse v_2 doit être plus grande que v_1.
- D'après Bernoulli, si la vitesse v_2 augmente (le terme $v^2/2g$ augmente), alors la pression P_2 doit diminuer (le terme $P/\rho g$ diminue) pour maintenir l'égalité.

Conclusion : Là où la vitesse du fluide augmente, sa pression diminue.

Cet effet a des applications innombrables :

- **Le pulvérisateur** : L'air soufflé à grande vitesse au-dessus du petit tube crée une basse pression qui aspire le liquide vers le haut.
- **L'aile d'avion** : Le profil de l'aile est conçu pour que l'air s'écoule plus vite sur sa surface supérieure (extrados) que sur sa surface inférieure (intrados). La vitesse plus élevée au-dessus crée une pression plus faible qu'en dessous. La différence de pression génère une force nette vers le haut : la portance.
- **Carburateurs des anciens moteurs** : L'air aspiré dans le moteur passe par un rétrécissement (le venturi) où sa vitesse augmente et sa pression chute, aspirant le carburant dans le flux d'air.

Le théorème de Bernoulli est un outil fondamental pour comprendre et concevoir des systèmes où les fluides sont en mouvement. Il nous permet de prédire les variations de pression et de vitesse, qui sont essentielles pour calculer les forces exercées par les fluides.

1.4. Notion de Pertes de Charge dans les Écoulements Réels

Le modèle du fluide parfait et le théorème de Bernoulli sont élégants et puissants, mais ils ont une limite : ils ignorent les frottements. Dans le monde réel, un fluide qui s'écoule dans une conduite perd de l'énergie à cause de la viscosité et du contact avec les parois. Cette énergie "perdue" se transforme en chaleur.

Cette perte d'énergie, exprimée en mètres de colonne de fluide (comme les termes de l'équation de Bernoulli), est appelée **perte de charge**.

1.4.1. L'Équation de Bernoulli Généralisée

Pour tenir compte de ces pertes, on introduit un terme correctif dans l'équation de Bernoulli. Entre deux points 1 et 2 d'un écoulement réel, l'énergie totale au point 2 sera inférieure à celle du point 1. La différence correspond aux pertes de charge survenues entre les deux points, notées ΔH_{1-2}.

L'équation de Bernoulli pour les fluides réels (ou "généralisée") s'écrit :

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2}$$

Cette équation se lit ainsi : l'énergie au point 1 est égale à l'énergie au point 2 PLUS l'énergie qui a été perdue en chemin sous forme de frottements.

Les pertes de charge sont la raison pour laquelle il faut des pompes puissantes pour acheminer l'eau sur de longues distances. Sans pompe pour redonner de l'énergie au fluide, la pression chuterait jusqu'à ce que l'écoulement s'arrête. On distingue deux types de pertes de charge.

1.4.2. Les Pertes de Charge Régulières (ou Linéaires)

Elles se produisent dans les sections de tuyauterie droites, de diamètre constant. Elles sont dues au frottement du fluide contre la surface interne de la conduite.

Elles dépendent de plusieurs facteurs :

- **La longueur de la conduite (L)** : Plus la conduite est longue, plus les pertes sont importantes.
- **Le diamètre de la conduite (D)** : Pour un même débit, une conduite plus petite entraîne une vitesse plus élevée et des pertes de charge beaucoup plus grandes.
- **La vitesse de l'écoulement (v)** : Les pertes de charge augmentent très rapidement avec la vitesse (généralement proportionnelles à v^2).
- **La rugosité de la paroi** : Un vieux tuyau en acier rouillé génère plus de frottements (et donc plus de pertes) qu'un tuyau neuf en PVC lisse.
- **La viscosité du fluide** : Une huile épaisse et visqueuse subira plus de pertes de charge que de l'eau.

La formule la plus courante pour les calculer est l'équation de Darcy-Weisbach :

$$\Delta H_r = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Où λ est le "coefficient de perte de charge", un nombre sans dimension qui dépend de la rugosité et du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent).

1.4.3. Les Pertes de Charge Singulières

Elles se produisent à chaque fois que la géométrie de la conduite change brusquement. Ces "accidents" de parcours perturbent l'écoulement et créent des tourbillons qui dissipent de l'énergie.

Les singularités les plus courantes sont :

- Les coudes (à 45°, 90°, etc.)
- Les vannes et robinets (même en position ouverte)

- Les changements de section (élargissement ou rétrécissement brusque)
- Les Tés et les bifurcations
- Les entrées et sorties de réservoir

Chaque singularité est caractérisée par un coefficient de perte de charge K, qui est une valeur sans dimension déterminée expérimentalement. La perte de charge pour une singularité donnée est calculée par :

$$\Delta H_s = K\frac{v^2}{2g}$$

Où v est la vitesse du fluide dans la conduite à l'endroit de la singularité.

1.4.4. Calcul de la Perte de Charge Totale

Dans un réseau de tuyauterie réel, comme le système de plomberie d'une maison ou une conduite industrielle, la perte de charge totale entre deux points est la somme de toutes les pertes de charge régulières et de toutes les pertes de charge singulières rencontrées sur le trajet.

$$\Delta H_{totale} = \sum \Delta H_r + \sum \Delta H_s$$

Le calcul précis des pertes de charge est une étape cruciale dans le dimensionnement des systèmes de fluides. Il permet de :

- **Choisir le bon diamètre de tuyau** : Un compromis entre le coût du tuyau (plus gros = plus cher) et le coût de l'énergie pour le pompage (plus petit = plus de pertes = plus d'énergie).
- **Déterminer la puissance de la pompe nécessaire** pour garantir un débit et une pression suffisants au point d'utilisation, après avoir compensé toutes les pertes.

Ressources Complémentaires

Analyse des Erreurs Fréquentes

1. **Erreur : Confondre vitesse et débit.**
   - **Analyse :** Le débit ($Q_v = A \cdot v$) est une quantité de fluide par temps (ex: m^3/s). La vitesse (v) est une distance par temps (ex: m/s). Dans une conduite qui se rétrécit, le débit reste constant (conservation de la masse), mais la vitesse augmente. Ne dites pas "le débit augmente dans le rétrécissement", mais "la vitesse augmente".