

# PETITE HYDROELECTRICITE: GUIDE TECHNIQUE POUR LA REALISATION DE PROJET



Sources des photos: ISET, Centre de Savoie, MHyLab

Ce document est la version française du "Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site" créé dans le cadre de l'ESHA, traduit et révisé en 2005 par l'Ademe (Fr), MHyLab (CH) et SCPTH (Fr).

ESHA: European Small Hydropower Association  
Association Européenne de la Petite Hydroélectricité  
Maison des Energies renouvelables  
63-65 Rue d'Arlon \* B- 1040 Bruxelles \* Belgique  
T: +32 2 546 1945 \* F: +32 2 546 1947  
E: maria.laguna@esha.be \* I: [www.esha.be](http://www.esha.be)



## **RESUME**

Développer une petite centrale hydroélectrique n'est pas une tâche facile. Ceci inclut une série importante d'aspects à considérer, du choix du site jusqu'au fonctionnement de la centrale. Cela demande également une connaissance générale diversifiée du promoteur sur des questions financières, légales, administratives et techniques. Ce guide rassemble tous ces aspects étape par étape, servant d'outil au promoteur potentiel d'une petite centrale hydroélectrique.

Il est divisé en neuf chapitres. Le chapitre 1 introduit les concepts fondamentaux, tels que la définition d'une petite centrale hydroélectrique, les types d'aménagements et les manières d'exploiter la ressource en eau. Il donne une vue d'ensemble du contenu du guide. Les chapitres suivants, décrivent les étapes essentielles à suivre pour une évaluation générale de l'aménagement avant de savoir si une étude de faisabilité détaillée doit être réalisée. Les aspects fondamentaux à observer concernent:

- ∇ La topographie et la géomorphologie du site.
- ∇ L'évaluation de la ressource en eau et son potentiel de production.
- ∇ La sélection du site et l'agencement de base.
- ∇ Les turbines hydrauliques, les générateurs et le contrôle-commande de l'installation.
- ∇ L'évaluation de l'impact environnemental du projet.
- ∇ L'ingénierie financière.
- ∇ Le cadre institutionnel et les procédures administratives pour obtenir les autorisations.

Lire ce guide aidera le futur exploitant d'une petite centrale hydroélectrique à comprendre les différents aspects, les phases et les procédures qui doivent être suivies pour la réaliser et la faire fonctionner.

Bernhard Pelikan  
Président d'ESHA



## **REMERCIEMENTS**

Ce guide est une version mise à jour et adaptée de la publication “Petite hydroélectricité : guide technique pour le montage de projets”, publiée par ESHA – the European Small Hydropower Association – en 1998 dans le cadre du programme ALTENER du DG-TREN de la Commission européenne (Directorate General for Transport and Energy).

Bien que basé sur la version originale, le guide a été entièrement mis à jour et adapté en raison des changements importants dans le secteur ces dernières années, concernant en particulier les aspects environnementaux et administratifs. La version mise à jour est disponible en anglais, français, allemand et suédois, tandis que les versions espagnole et italienne correspondent à la publication originale.

Le guide “Petite hydroélectricité : guide technique pour le montage de projets” a été réalisé au sein du Projet Héliovico-Européen “Thematic Network on Small Hydropower” (Réseau Thématique de la Petite Hydroélectricité), financé par le 5<sup>ème</sup> Programme Cadre RD&D (FP5). Il a été mis à jour et adapté par un Comité de Révision sous la coordination et les directives d’ESHA. Les membres du Comité de Révision sont parmi les partenaires de Projet: Francis Armand † (ADEME), Anton Schleiss (EPFL-LCH), Erik Bollaert (EPFL-LCH), Pedro Manso (EPFL-LCH), Jochen Bard (ISET), Jamie O’Nians (IT Power), Vincent Denis (MHyLab), Aline Choulot (MHyLab), Bernhard Pelikan (ÖVFK), Jean-Pierre Corbet (SCPTH), Christer Söderberg (SERO), Jonas Rundqvist (SERO) et Luigi Papetti (Studio Frosio).

La présente édition française a été entièrement relue et corrigée par ADEME, MHyLab et SCPTH.

Remerciements particuliers à Celso Penche (ESHA), auteur du Layman’s Guide.

**ESHA 2005**

**TABLE DES MATIERES**

<b><u>1 INTRODUCTION</u></b>	<b><u>19</u></b>
1.1 Une source d'énergie gratuite et potentiellement inépuisable.....	19
1.2 Définition d'une petite centrale hydroélectrique.....	20
1.3 Configurations des sites.....	20
1.3.1 Aménagements au fil de l'eau.....	20
1.3.2 Aménagements en pied de barrage.....	23
1.3.3 Aménagements intégrés dans un canal d'irrigation.....	24
1.3.4 Aménagements intégrés dans un réseau d'eau potable.....	25
1.4 Les étapes d'un projet d'aménagement d'une petite centrale hydroélectrique.....	26
<b><u>2 PRINCIPES HYDRAULIQUES</u></b>	<b><u>29</u></b>
2.1 Introduction.....	29
2.2 Ecoulement dans les conduites.....	29
2.2.1 Pertes de charge par frottement.....	32
2.2.2 Pertes de charge locales ou singulières.....	40
2.2.3 Régime transitoire.....	45
2.3 Écoulements dans les canaux.....	48
2.3.1 Classification des écoulements en canal.....	48
2.3.2 Écoulement uniforme en canal.....	49
2.3.3 Section transversale efficace.....	50
2.3.4 Principes d'énergie dans des écoulements en canal.....	51
<b><u>3 HYDROLOGIE</u></b>	<b><u>59</u></b>
3.1 Introduction.....	59
3.2 Mesures officielles des débit des cours d'eau.....	60
3.3 Evaluation des débits de cours d'eau par une mesure de débit.....	61
3.3.1 Méthode d'exploration du champ des vitesses.....	61
3.3.2 Méthode du déversoir.....	68
3.3.3 Méthode de la pente de la ligne d'eau.....	69
3.4 Caractéristiques des écoulements des cours d'eau .....	69
3.4.1 Courbe chronologique des débits.....	69
3.4.2 Courbes des débits classés.....	70
3.4.3 Courbes des débits classés standardisées.....	71
3.4.4 Courbes des débits classés partielles.....	74
3.4.5 Hauteur de chute.....	74
3.5 Débit réservé.....	77
3.6 Estimation de la puissance d'une centrale et de la production énergétique.....	77
3.6.1 Variation de la chute en fonction du débit et impact sur la puissance de la turbine.....	79
3.6.2 Production aux heures de pointe.....	81
3.7 Puissance garantie.....	81
3.8 Crues.....	82
3.8.1 Crues de projet.....	82
3.8.2 Analyse statistique des données de crues.....	83
3.8.3 Modélisation hydrologique d'un bassin versant.....	85

<b><u>4 METHODOLOGIES D'EVALUATION DES SITES1</u></b>	<b><u>87</u></b>
<b><u>4.1 Introduction.....</u></b>	<b><u>87</u></b>
<b><u>4.2 Cartographie.....</u></b>	<b><u>87</u></b>
<b><u>4.3 Etudes géotechniques.....</u></b>	<b><u>88</u></b>
4.3.1 Méthodologies.....	89
4.3.2 Méthodologies: étude de cas.....	90
<b><u>4.4 Analyse des échecs.....</u></b>	<b><u>98</u></b>
<b><u>5 STRUCTURES HYDRAULIQUES1</u></b>	<b><u>105</u></b>
<b><u>5.1 Introduction.....</u></b>	<b><u>105</u></b>
<b><u>5.2 Barrages.....</u></b>	<b><u>105</u></b>
5.2.1 Barrages en remblai.....	107
5.2.2 Barrages en béton.....	108
5.2.3 Autres types de barrages.....	109
5.2.4 Charges et stabilité des barrages de béton.....	110
5.2.5 Sécurité des barrages.....	111
<b><u>5.3 Déversoirs et évacuateurs de crues.....</u></b>	<b><u>112</u></b>
5.3.1 Déversoirs.....	113
5.3.2 Déversoirs avec vannes.....	115
5.3.3 Autres types d'évacuateurs.....	116
5.3.4 Pertes de charge.....	120
5.3.5 Grilles.....	121
5.3.6 Formation de vortex.....	125
<b><u>5.4 Bassins de décantation.....</u></b>	<b><u>127</u></b>
5.4.1 Général.....	127
5.4.2 Efficacité d'un bassin de décantation.....	128
5.4.3 Dimensionnement.....	128
<b><u>5.5 Vannes.....</u></b>	<b><u>129</u></b>
<b><u>5.6 Canaux à ciel ouvert.....</u></b>	<b><u>133</u></b>
5.6.1 Conception et dimensions.....	133
5.6.2 Excavation et stabilité.....	138
<b><u>5.7 Conduites forcées.....</u></b>	<b><u>141</u></b>
<b><u>5.8 Canaux de fuite.....</u></b>	<b><u>157</u></b>
<b><u>6 EQUIPEMENT ELECTROMECHANIQUE1</u></b>	<b><u>159</u></b>
<b><u>6.1 Centrale.....</u></b>	<b><u>159</u></b>
<b><u>6.2 Turbines hydrauliques.....</u></b>	<b><u>161</u></b>
6.2.1 Types et configuration.....	162
6.2.2 Vitesse spécifique et similitude.....	175
6.2.3 Conception préliminaire.....	178
6.2.4 Critère de sélection de turbine.....	181
6.2.5 Rendement des turbines.....	188
<b><u>6.3 Multiplicateurs de vitesse.....</u></b>	<b><u>191</u></b>
6.3.1 Type de multiplicateurs.....	191
6.3.2 Caractéristiques du multiplicateur.....	193
6.3.3 Maintenance des multiplicateurs.....	194
<b><u>6.4 Générateurs.....</u></b>	<b><u>194</u></b>
6.4.1 Configurations des générateurs.....	195

6.4.2 Excitatrices.....	196
6.4.3 Régulation de tension et synchronisation.....	197
<b>6.5 Régulation de turbine.....</b>	<b>197</b>
<b>6.6 Protection et connexion au réseau.....</b>	<b>200</b>
<b>6.7 Contrôle - commande.....</b>	<b>201</b>
<b>6.8 Equipements électriques auxiliaires.....</b>	<b>202</b>
6.8.1 Transformateur de service.....	202
6.8.2 Alimentation en courant continu.....	203
6.8.3 Mesures de niveau d'eau.....	203
6.8.4 Sous-station.....	204
<b>6.9 Exemples.....</b>	<b>204</b>
<b><u>7 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET MESURES DE REDUCTIONI</u></b>	<b><u>208</u></b>
<b>7.1 Introduction.....</b>	<b>208</b>
<b>7.2 Identification des charges financières et des impacts.....</b>	<b>209</b>
<b>7.3 Impacts pendant la phase de construction.....</b>	<b>211</b>
7.3.1 Réservoirs.....	211
7.3.2 Canaux d'entrée d'eau, canaux ouverts, conduites forcées, canaux de fuite.....	212
<b>7.4 Impacts générés par le fonctionnement de l'unité hydroélectrique.....</b>	<b>212</b>
7.4.1 Impacts sonores.....	212
7.4.2 Impact sur le paysage.....	214
7.4.3 Impacts biologiques.....	221
<b>7.5 Impacts des lignes de transmission.....</b>	<b>240</b>
7.5.1 Impact visuel.....	240
7.5.2 Impact sur la santé.....	241
<b>7.6 Conclusion.....</b>	<b>241</b>
<b><u>8 ANALYSE ECONOMIQUEI</u></b>	<b><u>243</u></b>
<b>8.1 Introduction.....</b>	<b>243</b>
<b>8.2 Considérations de base.....</b>	<b>243</b>
<b>8.3 Principes d'actualisation des valeurs monétaires.....</b>	<b>246</b>
<b>8.4 Méthodes d'évaluation économique.....</b>	<b>248</b>
8.4.1 Méthodes "statiques".....	249
8.4.2 Méthodes "dynamiques".....	250
8.4.3 Exemples.....	252
<b>8.5 Tarifs et primes.....</b>	<b>257</b>
<b><u>9 PROCEDURES ADMINISTRATIVESI</u></b>	<b><u>260</u></b>
<b>9.1 Introduction.....</b>	<b>260</b>
<b>9.2 Types de procédures.....</b>	<b>260</b>
9.2.1 Réglementation de l'énergie – Droits d'eau.....	261
9.2.2 Procédures environnementales.....	263
9.2.3 Spécifications de construction.....	267
9.2.4 Raccordement au réseau.....	267
9.2.5 Autres procédures.....	268

<b>9.3 Quelques exemples pratiques5.....</b>	<b>268</b>
9.3.1 Grèce.....	268
9.3.2 France6.....	270
9.3.3 Irlande.....	271
9.3.4 Autriche.....	273
9.3.5 Pologne.....	274
9.3.6 Portugal.....	274
9.3.7 Suisse.....	276

## **ANNEXE A : LA PETITE HYDROELECTRICITE SUR LE MARCHE INTERIEUR DE L'ÉLECTRICITÉ**

277

### **GLOSSAIRE**

296

### **LISTE DES FIGURES**

Figure 1.1 : Aménagement de haute chute.....	21
Figure 1.2 : Aménagement de basse chute avec conduite forcée.....	21
Figure 1.3 : Aménagement à basse chute intégré dans le barrage.....	22
Figure 1.4 : Aménagement de basse chute utilisant un barrage existant.....	23
Figure 1.5 : Aménagement de basse chute – montage en siphon.....	23
Figure 1.6 : Aménagement intégré utilisant un canal d'irrigation.....	24
Figure 1.7 : Aménagement à déversoir longitudinal utilisant un canal d'irrigation.....	25
Figure 1.8 : Aménagement intégré dans un système de distribution d'eau.....	26
Figure 2.9 : distribution de vitesse en écoulement laminaire et en écoulement turbulent.....	30
Figure 2.10 : Gradient hydraulique et gradient énergétique.....	32
Figure 2.11 : $\pi$ fonction du nombre de Reynolds.....	36
Figure 2.12 : Coefficients de perte de charge des grilles.....	41
Figure 2.13 : Valeurs de $K_c$ et de $K_{ex}$ en fonction de $d/D$ .....	42
Figure 2.14 : Coefficients de perte de charge dans les divergents.....	43
Figure 2.15 : Coefficients de perte de charge à l'entrée d'une conduite.....	44
Figure 2.16 : Coefficients de perte de charge dans les courbes.....	44
Figure 2.17 : Coefficients de perte de charge typiques pour un écoulement à travers des vannes.....	45
Figure 2.18 : Distribution typique pour un écoulement en canal ouvert.....	48
Figure 2.19 : Représentation de différents types de débits.....	49
Figure 2.20 : distribution de pression dans des canaux ayant un lit verticalement courbé.....	51
Figure 2.21 : Energie spécifique en fonction de la profondeur de l'écoulement.....	54
Figure 2.22 : Diagramme de Moody : Coefficient des frottement pour un écoulement dans une conduite.....	56
Figure 2.23 : Représentation d'une onde de pression dans une conduite.....	57
Figure 3.24 : Schéma type d'une installation hydroélectrique.....	59
Figure 3.25 : Mesure du niveau de la rivière, définitions.....	61
Figure 3.26 : Courbe de hauteur - débit.....	63
Figure 3.27 : Mesure de la section transversale.....	64
Figure 3.28 : Courbe d'évolution de la conductivité en fonction du temps.....	67
Figure 3.29 : Mesure des débits par déversoirs et canaux jaugeurs à col.....	68
Figure 3.30: Exemple d'enregistrement de débits.....	70
Figure 3.31: Exemple d'une courbe de débits classés.....	71
Figure 3.32 : Exemple de courbes de débits classés avec une échelle logarithmique.....	71
Figure 3.33 : Exemple de courbes de débits classés standardisées.....	72
Figure 3.34 : Conduite forcée (exemple 3.1).....	75
Figure 3.35 : Définition du débit réservé.....	78
Figure 3.36 : Exemple de rendement de turbine en fonction du débit.....	79
Figure 3.37 : Variation de la chute nette (en trait tillé) et de la puissance (en pointillé) en fonction du débit de la rivière.....	80

Figure 3.38 : Composants d'un modèle hydrologique.....	85
Figure 4.39 : Représentation schématique du site.....	90
Figure 4.40 : Emplacement du barrage et structures des deux berges.....	91
Figure 4.41 : Section géologique de la formation colluviale.....	91
Figure 4.42 : Aménagement géomorphologique d'un traçage de canal.....	92
Figure 4.43 : Coupe schématique de la galerie sous les colluvions.....	94
Figure 4.44 : Finition en béton définissant la section finale de la galerie.....	95
Figure 4.45 : Faille présente dans la galerie de La Rienda.....	96
Figure 4.46 : Résultats de l'opération d'injection de ciment.....	98
Figure 4.47 : Aménagement de Ruahihi.....	99
Figure 4.48 : Profil en long de l'aménagement de La Marea.....	101
Figure 4.49 : Vue en plan de l'aménagement de La Marea.....	101
Figure 5.50 : Barrage en remblai constitué de différents matériaux avec noyau de moraine.....	107
Figure 5.51 : Géométries types des barrages-voûtes à simple et à double courbure.....	109
Figure 5.52 : Barrage maçonné à masque amont vertical en béton.....	110
Figure 5.53 : Barrages en bois.....	110
Figure 5.54 : Répartition des efforts sur les barrages en béton.....	111
Figure 5.55 : Structures de déversoirs fixes et mobiles.....	113
Figure 5.56 : Caractéristiques et formules de calcul de débits pour les déversoirs.....	114
Figure 5.57 : Configuration de seuils.....	115
Figure 5.58 : Caractéristiques et formules de débit pour des déversoirs avec vannes.....	116
Figure 5.59 : Batardeaux encastrés et articulés.....	117
Figure 5.60 : Courants secondaires dans les courbures de rivières.....	117
Figure 5.61 : Agencement type d'une prise latérale.....	118
Figure 5.62 : Prise d'eau dite par en dessous.....	119
Figure 5.63 : Prise d'eau "tyrolienne".....	120
Figure 5.64 : Prise d'eau française : Canal construit dans le lit de la rivière et protégé par une grille.....	121
Figure 5.65 : Agencement de dromes.....	122
Figure 5.66 : Formule de calcul de pertes de charge dans les grilles.....	123
Figure 5.67 : Dégrilleur oléo-hydraulique.....	124
Figure 5.68 : Hauteur minimale de recouvrement.....	127
Figure 5.69 : Bassins de décantation.....	128
Figure 5.70 : Dispositif d'arrêt en forme de coin.....	130
Figure 5.71 : Vanne-papillon (principe).....	132
Figure 5.72 : Vanne sphérique (principe).....	132
Figure 5.73 : Conception des canaux.....	139
Figure 5.74 : Canal renforcé rectangulaire.....	139
Figure 5.75 : Matériaux utilisés pour la protection.....	139
Figure 5.76 : Conduite forcée.....	142
Figure 5.77 : Conduite forcée avec blocs d'ancrage en béton et joints de dilatation.....	143
Figure 5.78 : Conduite en acier mécano soudée.....	144
Figure 5.79 : Optimisation économique.....	147
Figure 5.80 : Conduite forcée, pertes de charge et turbulence.....	148
Figure 5.81 : Cheminée d'équilibre.....	154
Figure 5.82 : Variation de la hauteur d'eau dans la cheminée d'équilibre en fonction du temps.....	155
Figure 6.83 : Coupe schématique d'une centrale basse chute intégrée au barrage.....	160
Figure 6.84 : Coupe schématique d'une centrale à moyenne ou haute chute.....	160
Figure 6.85 : Vue schématique d'un aménagement hydroélectrique et des sections de mesure.....	163
Figure 6.86 : Coupe d'un injecteur avec déflecteur.....	164
Figure 6.87 : Vue d'une Pelton à deux injecteurs et axe horizontal.....	165
Figure 6.88 : Vue d'une Pelton à 2 injecteurs et axe vertical.....	165
Figure 6.89 : Principe d'une turbine Turgo.....	166
Figure 6.90 : Schéma de principe d'une turbine à flux traversant.....	166
Figure 6.91 : Principe de fonctionnement des directrices du distributeur.....	168
Figure 6.92 : Vue d'une turbine Francis à axe vertical.....	169

Figure 6.93 : Energie cinétique restant en sortie de roue.....	170
Figure 6.94 : Coupe d'une turbine Kaplan à double réglage.....	171
Figure 6.95 : Coupe longitudinale d'une turbine bulbe à double réglage.....	171
Figure 6.96: Coupe d'une installation de turbine Kaplan à axe vertical.....	173
Figure 6.97: Coupe d'une installation de turbine Kaplan en siphon à axe incliné.....	173
Figure 6.98: Coupe d'une installation de turbine Kaplan en siphon inversée.....	173
Figure 6.99: Coupe d'une installation de turbine Kaplan à axe incliné.....	173
Figure 6.100: Coupe d'une installation de turbine Kaplan en S.....	173
Figure 6.101: Coupe d'une installation de turbine Kaplan à renvoi d'angle et axe incliné.....	173
Figure 6.102: Coupe d'une installation de turbine Kaplan en puits et axe incliné.....	174
Figure 6.103 : Tracé des roues de turbine Francis en fonction de la vitesse spécifique ns.....	176
Figure 6.104 : Vitesse spécifique en fonction de la chute nette $H_n = E/g$ .....	177
Figure 6.105 : Caractéristiques des injecteurs.....	179
Figure 6.106: Coupe d'un roue Francis.....	180
Figure 6.107 : Coupe d'une turbine Kaplan.....	181
Figure 6.108 : Domaine d'utilisation des différents types de turbines.....	183
Figure 6.109 : Limites de cavitation.....	186
Figure 6.110 : Comparaison entre la mesure de rendement d'une turbine réelle construite sans développement en laboratoire et les performances possibles avec une technique garantie.....	188
Figure 6.111 : Représentation schématique des pertes d'énergie dans un aménagement hydroélectrique.....	189
Figure 6.112 : Niveaux de rendement des petites turbines hydroélectriques.....	190
Figure 6.113: Multiplicateur à arbres parallèles.....	192
Figure 6.114: Multiplicateur à engrenages coniques.....	192
Figure 6.115: Multiplicateur à courroie.....	192
Figure 6.116 : Générateur à axe vertical couplé directement à une turbine Kaplan.....	196
Figure 6.117 : Régulateur de vitesse mécanique.....	199
Figure 6.118 : Mesure de niveau.....	204
Figure 7.119 : Schéma de l'aménagement de Cordiñanes.....	215
Figure 7.120 : Section transversale de l'aménagement de Neckar.....	221
Figure 7.121 : Exemple de courbe de débits classés en fonction de temps.....	226
Figure 7.122 : Section transversale d'un lit de rivière.....	228
Figure 7.123 : Relation entre le débit environnemental et la morphologie du lit de rivière.....	230
Figure 7.124 : Dispositifs à seuils rectangulaires.....	231
Figure 7.125 : Passe à poissons à chicanes.....	232
Figure 7.126 : Passe à poissons à fentes verticales.....	233
Figure 7.127 : Passe à poissons Denil.....	234
Figure 7.128 : Coupe de l'écluse de Borland.....	234
Figure 7.129 : Dispositif d'attrait.....	235
Figure 7.130 : Schéma de l'écran de Coanda.....	237
Figure 7.131 : Barrière à poissons bioacoustique.....	239
Figure 8.132 : Coût spécifique des capacités installées en Euros/kW, en fonction de la chute (mètres) .....	244
Figure 8.133 : Coûts d'investissement par capacité installée pour des hauteurs de chutes données.....	244
Figure 8.134 : Coûts d'investissements « clefs en main » selon ESTIR pour les petites centrales hydroélectriques (minima, moyens et maxima).....	245
Figure 9.135 : Réglementation du débit réservé en Suisse.....	266
Figure 9.136 : Organigramme des procédures administratives portugaises.....	275
Figure 5.137 : Barrage gonflable.....	300
Figure 5.138 : Représentation schématique d'un seuil en siphon.....	302
Figure 5.139 : Vue schématique d'un évacuateur en puits dans un canal.....	302
Figure 5.140 : Déversoir de type labyrinthe vu de dessus.....	303
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	
Tableau 2.1 : Rugosité "e" pour différentes conduites du commerce.....	33
Tableau 2.2 : Coefficient de Manning n pour différentes conduites du commerce .....	38
Tableau 2.3 : Coefficients de Hazen-Williams.....	39
Tableau 2.4 : Pertes supplémentaires dans les grilles pour des approches non perpendiculaires.....	41

Tableau 2.5 : Caractéristiques géométriques de différents profils de canal.....	55
Tableau 2.6 : Formules empiriques utilisées pour estimer $y_c$ dans les canaux.....	55
Tableau 3.7: Valeurs types du coefficient de Manning $n$ pour des cours d'eau.....	69
Tableau 3.8 : Débit technique minimum des turbines.....	79
Tableau 3.9 : critères types pour une crue de projet.....	83
Tableau 3.10 : Probabilité d'occurrence.....	83
Tableau 5.11 : Paramètres hydrauliques pour des sections transversales de canal conventionnelles.....	135
Tableau 5.12 : Profil optimum pour différentes sections de canal.....	135
Tableau 5.13 : Différentes caractéristiques de matériaux.....	145
Tableau 6.14 : Configuration de turbine Kaplan.....	172
Tableau 6.15 : Echelle de vitesse spécifique pour chaque type de turbine.....	177
Tableau 6.16 : Domaine d'utilisation des différents types de turbines.....	182
Tableau 6.17 : Capacité de réponse aux variations de chute et de débit des différents types de turbines.....	183
Tableau 6.18 : Vitesse de rotation des générateurs.....	187
Tableau 6.19 : Vitesse d'emballage des turbines.....	187
Tableau 6.20 : Niveaux de rendement des petites turbines.....	191
Tableau 6.21 : Niveau de rendement des petits générateurs.....	195
Tableau 7.22 : Impacts durant la construction.....	210
Tableau 7.23 : Impacts durant le fonctionnement.....	211
Tableau 7.24 : Méthodes basées sur des valeurs hydrologiques ou statistiques.....	226
Tableau 7.25 : Méthodes basées sur des principes « physiographiques ».....	227
Tableau 7.26 : Formules basées sur la vitesse et la profondeur d'eau.....	227
Tableau 7.27 : Méthodes basées sur une analyse multicritères en considération des paramètres écologiques.....	227
Tableau 8.28 : Coefficient d'actualisation pour différentes périodes $n$ et un taux d'actualisation $r$ .....	248
Tableau 8.29 : Analyse de la marge brute d'autofinancement.....	253
Tableau 8.30 : VAN en fonction du taux d'actualisation ( $r$ ) et de la durée de vie ( $A_n$ ).....	254
Tableau 8.31 : $R_b/c$ en fonction du taux d'actualisation ( $r$ ) et de la durée de vie ( $A_n$ ).....	254
Tableau 8.1.32 : VAN, $R_b/c$ et TIR pour différents tarifs (où $r$ est de 8 % et la période de 35 ans).....	255
Tableau 8.33 : Exemple B – Cash flow (ou flux de trésorerie) annuel pour un investissement financé par emprunt.....	255
Tableau 8.34 : Analyse financière d'aménagements réels en Europe.....	256
Tableau 8.35 : Prix de vente de l'électricité produite par les PCH (Petites centrales Hydrauliques) dans les pays de l'Union Européenne.....	257
Tableau 9.36 : Droits pour l'utilisation de l'eau en UE-15.....	262
Tableau 5.37 : Caractéristiques des prises d'eau.....	304

## LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photographie 3.1 : Station hydrologique dans une rivière.....	62
Photographie 3.2 : Moulins hydrométriques à éléments rotatifs.....	65
Photographie 4.3 : Vue générale de la pente latérale droite.....	92
Photographie 4.4 : Instabilités locales générées durant le travail d'excavation.....	93
Photographie 4.5 : Un des escarpements glissants existants avant le début des travaux.....	93
Photographie 4.6 : Vue des colluvions de Cordiñanes, sous lesquels passe la galerie.....	94
Photographie 4.7 : Vue de la galerie en travaux.....	95
Photographie 4.8 : Vue du bétonnage de la galerie.....	97
Photographie 4.9 : Vue du bétonnage de la galerie.....	97
Photographie 4.10 : Les effets des infiltrations sous le canal.....	100
Photographie 4.11 : Bassin de La Marea.....	102
Photographie 4.12 : Seuil affouillé par des infiltrations.....	103
Photographie 4.13 : Seuil affouillé par des infiltrations.....	103
Photographie 4.14: Canal détruit par une pression d'élévation.....	104
Photographie 5.15 : Exemples de barrage-poids BCR (a) et de barrage à contreforts (b).....	108

Photographie 5.16 : Exemple de barrage-voûte.....	109
Photographies 5.17 : Rupture d'un petit barrage, la fissure et l'inondation en aval.....	112
Photographie 5.18 : Seuil déversant.....	115
Photographie 5.19 : Batardeaux mobiles articulés.....	117
Photographie 5.20 : Prise d'eau par en dessous.....	119
Photographie 5.21: Dromes préfabriquées.....	122
Photographie 5.22 : Dégrilleur oléo-hydraulique.....	124
Photographie 5.23 : Vanne de régulation et déversoir latéral.....	130
Photographie 5.24 : Vérin hydraulique de commande de vanne.....	131
Photographie 5.25 : Grande vanne-papillon.....	132
Photographie 5.26 : Vanne-papillon.....	132
Photographies 5.27 : Vanne à segment (à gauche) et son emplacement entre deux piles en béton.....	133
Photographie 5.28: Canal dans les Cordiñanes.....	140
Photographie 5.29 : Déversoir latéral.....	140
Photographie 5.30 : Elévation.....	141
Photographie 5.31 : Canal autoporté.....	141
Photographie 5.32 : Jet d'eau.....	155
Photographie 6.33 : Vue d'ensemble d'une petite centrale typique.....	161
Photographie 6.34 : Roue de turbine Pelton.....	165
Photographie 6.35 : Turbine Francis à axe horizontal.....	168
Photographie 6.36 : Cercle de vannage de turbine Francis à axe horizontal.....	169
Photographie 6.37 : Roue Francis.....	169
Photographie 6.38 : Roue Kaplan.....	171
Photographie 6.39 : Vue de turbines Kaplan en siphon.....	174
Photographie 7.40 : Cordiñanes.....	215
Photographie 7.41 : Seuil de Cordiñanes.....	216
Photographie 7.42 : Barrage de Vilhelmina en Suède.....	216
Photographie 7.43 : Prise d'eau.....	217
Photographie 7.44 : Phase de construction - excavation.....	217
Photographie 7.45 : Phase de construction – canal en béton.....	218
Photographie 7.46 : Phase de construction – canal terminé.....	218
Photographie 7.47 : Entrée du tunnel durant la construction.....	219
Photographie 7.48 : Entrée du tunnel recouvert.....	219
Photographie 7.49 : Centrale.....	220
Photographie 7.50 : Sous-station située dans la centrale.....	220
Photographie 7.51 : Centrale de Neckar.....	221
Photographie 7.52 : Passe à poissons de construction rustique.....	231
Photographie 7.53 : Passe à poissons munie de fentes verticales.....	232
Photographie 7.54 : Passe à poissons Denil.....	233
Photographie 7.55 : Centrale et passe à poissons (sur la gauche).....	236
Photographie 7.56 : Grille de Coanda.....	238
Photographie 7.57 : Impact visuel d'une sous-station.....	241
Photographie 5.58 : Batardeau commandé par un boudin de caoutchouc gonflable.....	300
Photographie 5.59 : Vannes fusibles Hydroplus.....	301

## **1 INTRODUCTION**

### **1.1 Une source d'énergie gratuite et potentiellement inépuisable**

A la suite de la “Troisième conférence des Parties de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique” tenue à Kyoto en décembre 1997, l'Union Européenne a reconnu l'urgence d'aborder le problème du changement climatique. Elle s'est également fixée comme objectif une réduction, d'ici 2010, de 8% de ses émissions de gaz à effet de serre sur la base des émissions de 1990, bien que l'objectif des pays industrialisés ne soit que de 5%. Afin d'aider les Etats membres dans la réalisation de cet objectif, la Commission Européenne a identifié une série d'actions à mettre en œuvre dans le domaine de l'énergie dans le but de réduire la consommation d'énergie et la concentration de carbone. L'accélération du développement des énergies renouvelables apparaît comme une étape primordiale dans la diminution de la concentration de carbone et, par conséquent, dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

En conséquence, le Conseil et le Parlement de l'UE ont adopté la Directive 2001/77/CE sur la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable.

Depuis le début de l'électrification de l'Europe, l'énergie hydraulique est la première source d'énergie renouvelable utilisée pour produire de l'électricité. Aujourd'hui, l'hydroélectricité (petite et grande) dans l'Union Européenne représente, selon le Livre Blanc, 13 % de l'électricité produite, réduisant ainsi les émissions de CO<sub>2</sub> de plus de 67 millions de tonnes par an. Alors que l'hydroélectricité conventionnelle entraîne la réalisation d'infrastructures importantes pouvant entraîner des coûts sociaux et environnementaux non négligeables, les petites centrales hydroélectriques correctement conçues peuvent facilement être intégrées dans les écosystèmes locaux.

En 2001, les centrales hydroélectriques de l'Union Européenne ont produit environ 365 TWh, à partir d'une puissance totale de 118 GW. Les petites centrales hydroélectriques représentent 8% de la capacité installée (9,9 GW) et produisent 39 TWh (environ 11% de la production hydroélectrique totale). En supposant un environnement réglementaire plus favorable, l'objectif de la Commission Européenne de 14 GW d'ici 2010 devrait être atteint, la petite hydroélectricité devenant alors la seconde énergie renouvelable après l'énergie éolienne.

La grande majorité des petites centrales hydroélectriques sont des aménagements “au fil de l'eau”, ce qui signifie que les turbines produisent de l'électricité lorsque les débits du cours d'eau sont suffisants pour les alimenter. Normalement, ces sites n'ont pas la capacité de stocker de l'eau dans le but de produire de l'électricité durant les heures de pointe, bien qu'il existe quelques exceptions, particulièrement dans les aménagements de haute chute. La production cesse lorsque le débit de la rivière descend en dessous du seuil technique de fonctionnement des équipements.

Certaines centrales sont des systèmes autonomes utilisés pour l'électrification de sites isolés, on parle alors de centrale en îlot, mais, dans la plupart des cas en Europe, l'électricité produite est injectée dans le réseau.

La connexion au réseau permet un contrôle automatique simplifié, la fréquence du courant étant assignée par le réseau. Elle implique la vente de l'énergie à une société de distribution. Durant les dernières années, conscients des bénéfices environnementaux des énergies renouvelables, la plupart des gouvernements des Etats membres, soutenus par la Directive E-SER ont fixé le prix de rachat tenant compte de ces bénéfices en comparaison avec les énergies fossiles dont le prix peut être plus

bas. Le Portugal, l'Espagne et l'Allemagne ont prouvé que des prix de rachat raisonnables étaient essentiels pour augmenter la production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables.

## **1.2 Définition d'une petite centrale hydroélectrique**

Il n'existe pas de consensus dans les pays membres de l'UE concernant la définition d'une petite centrale hydroélectrique. Quelques pays, comme le Portugal, l'Espagne, l'Irlande, et plus récemment la Grèce et la Belgique, acceptent 10 MW de puissance comme limite supérieure. En Suède, la limite est fixée à 1,5 MW alors qu'en Italie, le seuil est de 3 MW. En France, la limite a récemment été établie à 12 MW, non en tant que limite explicite des PCH (Petites Centrales Hydroélectriques), mais en tant que puissance installée maximum pour laquelle le réseau a l'obligation d'acheter l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable. Au Royaume-Uni, il n'existe pas de limite, bien que 10 MW soit généralement accepté comme seuil pour les petites centrales hydroélectriques. Dans le cadre de ce document, tout aménagement ayant une puissance installée égale ou inférieure à 10 MW sera considéré comme une petite centrale hydroélectrique, ce seuil étant adopté par cinq Etats membres, l'ESHA, la Commission Européenne et l'UNIPED (Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Electricité).

## **1.3 Configurations des sites**

L'objectif d'une centrale hydroélectrique est de convertir l'énergie potentielle et cinétique d'une masse d'eau s'écoulant entre deux points d'altitudes différentes, présentant ainsi une dénivellation (ou hauteur de chute), en énergie électrique. La puissance de la centrale est proportionnelle au débit prélevé dans le cours d'eau et à la dénivellation.

Selon la hauteur de chute, les centrales peuvent être classées en trois catégories :

- ∇ Centrale à haute chute : 100 m et plus
- ∇ Centrale à moyenne chute : 30-100 m
- ∇ Centrale à basse chute : 2-30 m

Cette classification n'est pas rigide mais permet de définir la catégorie des sites. Elle correspond de plus à des types de machines différents.

Parmi les applications, nous pouvons citer :

- ∇ Les centrales au fil de l'eau
- ∇ Les centrales de pied de barrage
- ∇ Les centrales intégrées dans un canal ou un système d'approvisionnement en eau

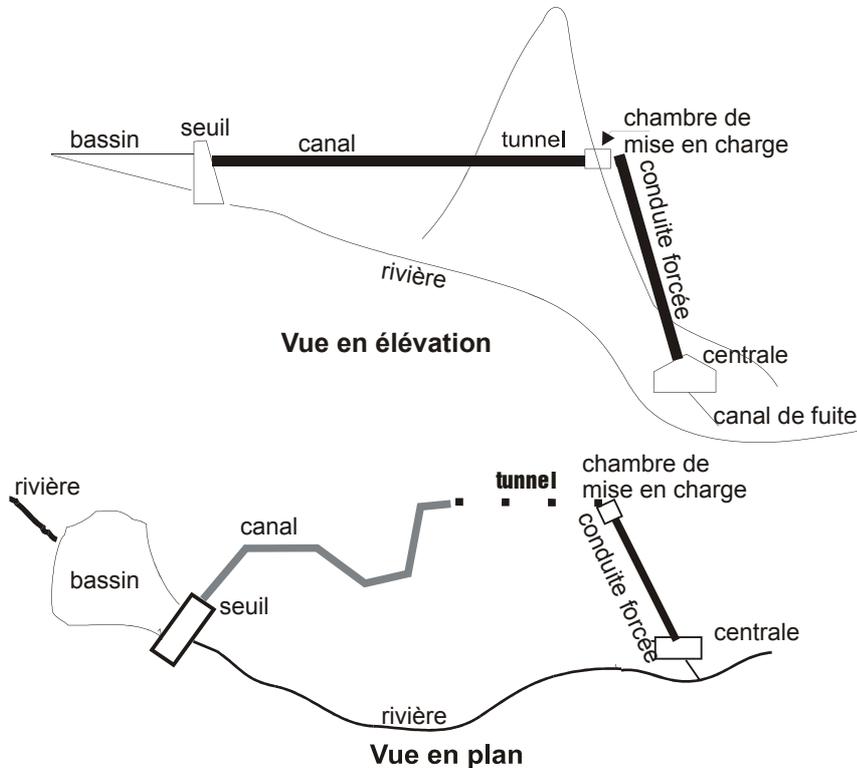
### **1.3.1 Aménagements au fil de l'eau**

Dans les aménagements au fil de l'eau, la turbine produit de l'électricité à partir de l'eau disponible prélevée dans le cours d'eau. Lorsque le débit du cours d'eau descend sous le débit technique minimum nécessaire au fonctionnement de la turbine équipant la centrale, la production cesse.

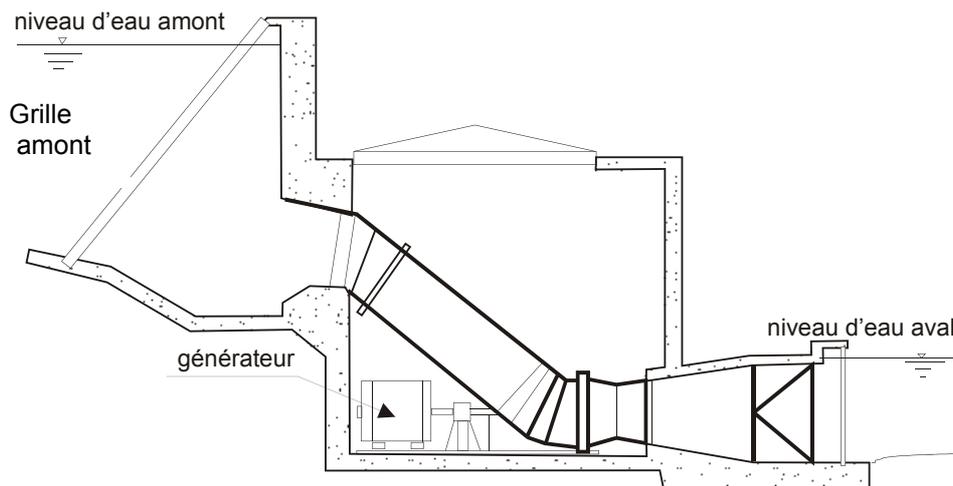
Les aménagements de moyennes et hautes chutes utilisent des seuils pour dériver l'eau vers la prise d'eau. L'écoulement est alors dirigé vers les turbines par une conduite en charge ou conduite forcée. Les conduites forcées étant chères, elles sont essentiellement utilisées dans les aménagements à haute chute dont la puissance peut être élevée bien que le débit soit faible. Une solution permettant de limiter les coûts (figure 1.1) consiste à transporter l'eau par un canal à faible pente, longeant le cours d'eau vers une chambre de mise en charge, puis par une courte conduite forcée vers les

turbines. Si la topographie et la morphologie du terrain ne permettent pas l'agencement d'un canal, une conduite à basse pression peut constituer une option économique. A la sortie des turbines, l'eau retourne à la rivière par un canal de fuite.

**Figure 1.1 : Aménagement de haute chute**



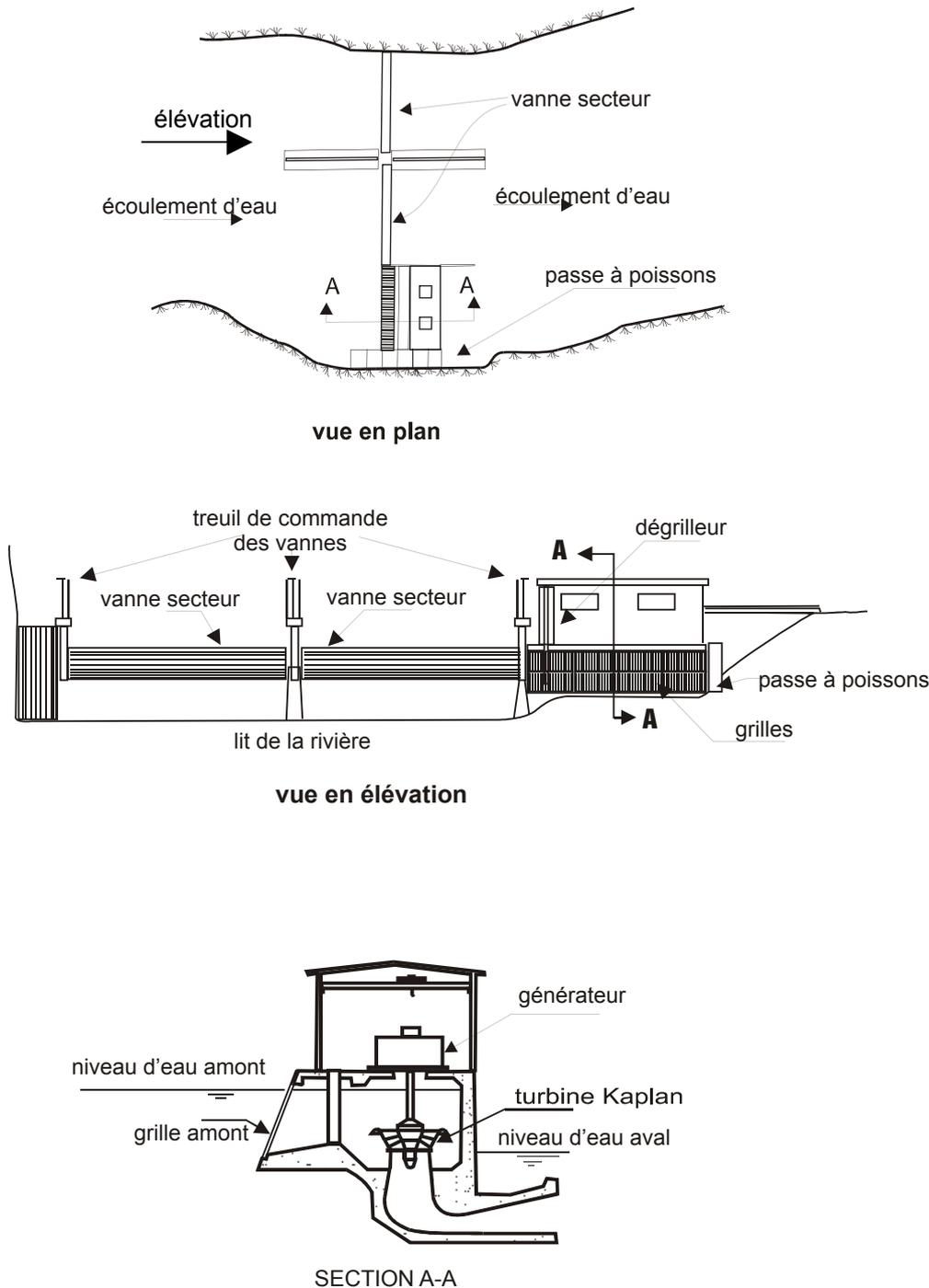
**Figure 1.2 : Aménagement de basse chute avec conduite forcée**



Dans certains cas, un petit réservoir, stockant assez d'eau pour fonctionner uniquement durant les heures de pointe où le prix de vente de l'énergie est plus élevé, peut être créé par le seuil ou un bassin construit au niveau de la chambre de mise en charge.

Les aménagements à basse chute sont construits généralement dans les régions de plaine où dans les vallées. Deux options technologiques peuvent être choisies : soit l'eau est détournée vers une centrale par l'intermédiaire d'une courte conduite forcée (figure 1.2), comme dans les aménagements de haute chute, soit la chute est créée par un petit barrage, équipé de vannes secteur, d'une prise d'eau intégrée (figure 1.3), d'une centrale et d'une passe à poissons.

**Figure 1.3 : Aménagement à basse chute intégré dans le barrage**

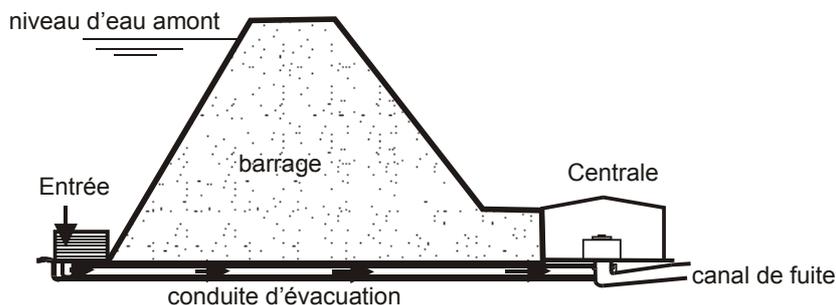


### 1.3.2 Aménagements en pied de barrage

Pour des raisons économiques, un petit aménagement hydroélectrique n'est en général pas compatible avec un grand réservoir permettant d'exploiter la centrale au moment le plus approprié. Si, par contre, le réservoir a déjà été construit à d'autres fins (contrôle des crues, réseau d'irrigation, alimentation en eau d'une grande ville, zone de loisirs, etc.), il peut être possible de produire de l'électricité en turbinant soit un débit compatible avec son utilisation première, soit le débit réservé à des fins écologiques sortant de la retenue.

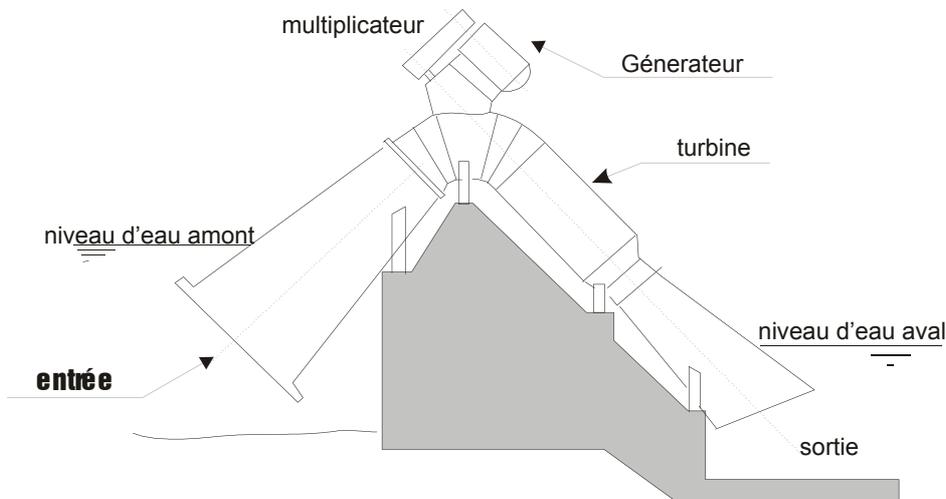
La question principale est de savoir comment implanter la turbine sur site. Si le barrage comporte un ouvrage de fond, comme sur la figure 1.4, la solution est évidente.

**Figure 1.4 : Aménagement de basse chute utilisant un barrage existant**



Sinon, pour autant que le barrage ne soit pas trop haut, un système en siphon peut être installé. Des aménagements de ce type (figure 1.5) fournissent une solution élégante pour des dénivellations jusqu'à 10 mètres et pour des groupes de puissance inférieure à 1 000 kW, bien que des exceptions existent par exemple en Suède (11MW) ou aux USA (30.5 m). La turbine peut être située au sommet du barrage ou sur le parement aval. Le groupe peut être livré pré-monté sur le site et installé sans modification importante du barrage.

**Figure 1.5 : Aménagement de basse chute – montage en siphon**

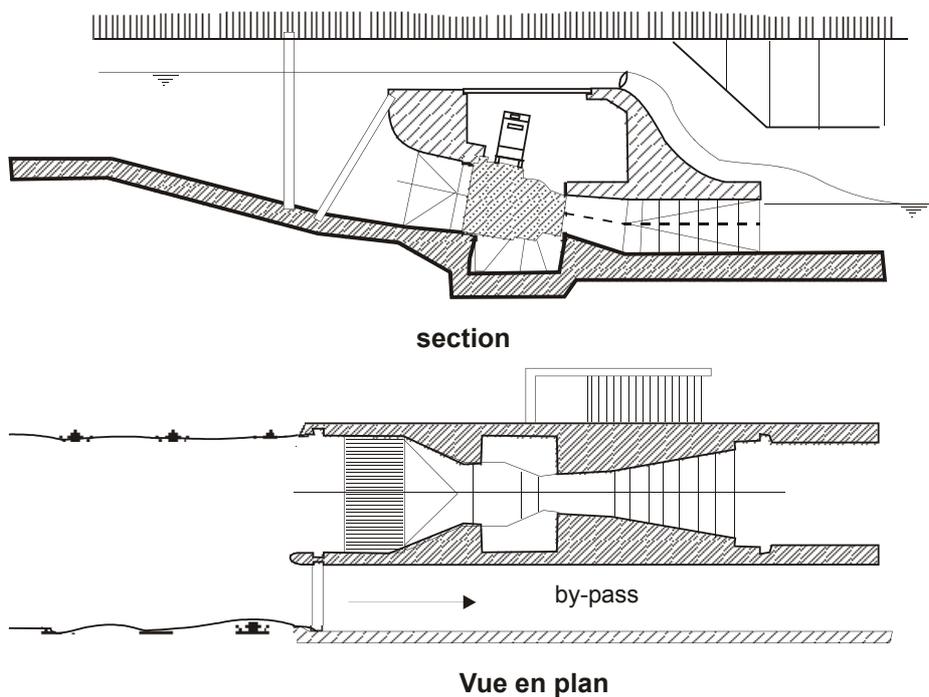


### 1.3.3 Aménagements intégrés dans un canal d'irrigation

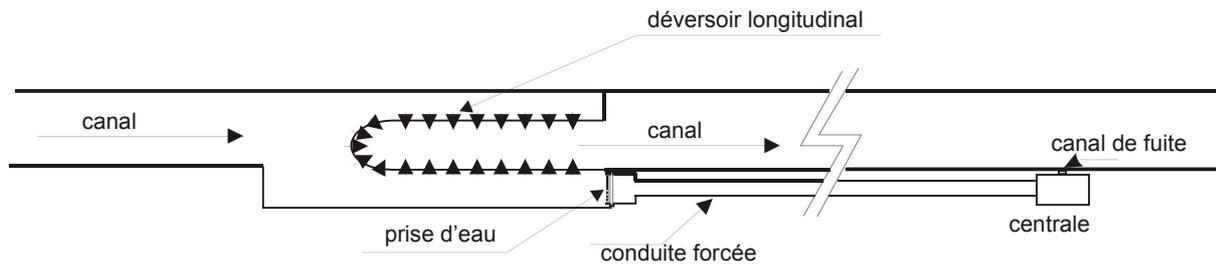
Deux types d'aménagements peuvent être conçus pour exploiter une dénivellation dans un canal d'irrigation :

- ∇ Le canal est localement agrandi pour installer la prise d'eau, la centrale électrique, le canal de fuite et le by-pass latéral. La figure 1.6 représente un aménagement de ce type, avec une centrale immergée équipée d'une turbine Kaplan et un multiplicateur à renvoi d'angle. Pour garantir en tout temps l'alimentation en eau pour l'irrigation, l'aménagement peut inclure un by-pass latéral, comme sur la figure. Pour des raisons évidentes de coût, une telle solution doit être conçue en même temps que le canal.

**Figure 1.6 : Aménagement intégré utilisant un canal d'irrigation**



- ∇ Si le canal existe déjà, un aménagement, comme celui représenté sur la figure 1.7, est une option convenable. Le canal doit être légèrement agrandi pour inclure la prise d'eau et le déversoir. Pour réduire la largeur de la prise d'eau au minimum, un déversoir ayant un seuil long doit être installé. A partir de la prise d'eau, une conduite forcée longeant le canal dirige l'eau en pression vers la turbine. L'eau passe dans la turbine et retourne au cours d'eau par un court canal de fuite.

**Figure 1.7 : Aménagement à déversoir longitudinal utilisant un canal d'irrigation**

En général, il n'y a pas de poissons dans les canaux d'irrigation et les passes à poissons ne sont pas requises.

#### 1.3.4 Aménagements intégrés dans un réseau d'eau potable

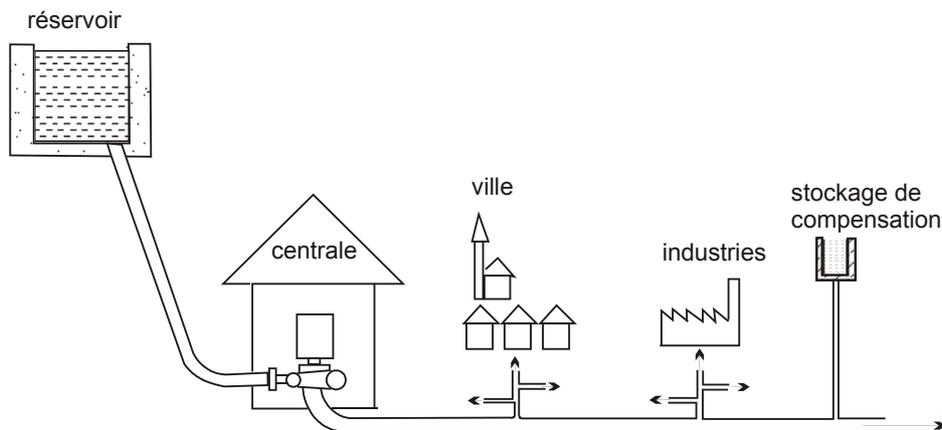
L'eau potable est souvent fournie à une agglomération en transportant l'eau par une conduite en charge depuis un réservoir d'eau amont.

Lorsque les différences d'altitude entre la chambre de captage (ou la chambre de mise en charge) et l'usine de traitement (ou le réservoir de tête de réseau) sont importantes, la pression excédentaire est habituellement dissipée dans des vannes brise-charge. L'installation d'une turbine à l'extrémité de la conduite permet de valoriser cette pression en la transformant en électricité.

Comme pour tout organe de régulation de débit (par exemple vannes à flotteurs) installé sur une conduite forcée, il conviendra d'être attentif au phénomène de coup de bélier, particulièrement lorsque la turbine est installée sur une conduite existante en charge.

Pour assurer la continuité de l'alimentation en eau en cas d'arrêt de la turbine (maintenance, débit entrant insuffisant, etc.), il convient d'installer un système de by-pass automatique. Comme la turbine, ce dispositif prend alors le relais et fonctionne également comme organe de régulation de débit asservi au niveau de la chambre de mise en charge ou du réservoir amont. Enfin, il est possible d'installer un by-pass auxiliaire s'ouvrant rapidement par l'intermédiaire d'un contrepoids, lequel ne permet alors plus aucune régulation. Toutes les manoeuvres d'ouverture et de fermeture des vannes doivent cependant être réalisées assez lentement, de manière à maintenir les variations de pression dans des limites acceptables.

Le système de commande est plus complexe dans les systèmes où une contre-pression existe en sortie de turbine, comme représenté sur la figure 1.8. Il convient dans ce cas non seulement de contrôler le niveau amont, mais également la pression à l'aval de la turbine.

**Figure 1.8 : Aménagement intégré dans un système de distribution d'eau**

#### **1.4 Les étapes d'un projet d'aménagement d'une petite centrale hydroélectrique**

Le projet définitif résulte d'un processus complexe et itératif, dans lequel l'accent est mis sur l'impact environnemental et sur les différentes options technologiques ; celles-ci sont alors comparées sur le plan économique.

Bien qu'il ne soit pas facile de fournir un guide détaillé sur l'évaluation d'un aménagement, il est possible d'en décrire les étapes essentielles, avant de décider si l'une ou l'autre doit être soumise à une étude approfondie en vue de sa réalisation. Les étapes sont les suivantes :

- ∇ Topographie et géomorphologie du site
- ∇ Evaluation de la ressource en eau et du potentiel énergétique
- ∇ Sélection du site et définition de l'aménagement de base
- ∇ Turbines, génératrices, contrôle commande de l'installation, etc.
- ∇ Evaluation des impacts sur l'environnement et des mesures de compensation
- ∇ Evaluation économique du projet et besoins de financement
- ∇ Cadre institutionnel et procédures administratives pour obtenir les autorisations

L'écoulement de l'eau dans des canaux naturels ou artificiels, dans des conduites haute et basse pression, sur des seuils et dans les turbines, est régi par les lois fondamentales de la mécanique des fluides. Dans le chapitre 2, ces principes sont rappelés, de même que quelques équations simplifiées ou empiriques émanant de l'expérience acquise par des siècles de constructions hydrauliques.

Pour affirmer qu'un aménagement est viable, il est nécessaire de commencer par évaluer la ressource en eau existant sur le site (hydrologie). Le potentiel de l'aménagement est proportionnel au produit du débit par la chute. Excepté pour les aménagements basses chutes, la dénivellation

(également appelée chute brute) peut généralement être considérée constante, tandis que le débit varie durant l'année.

Le choix de l'équipement approprié et l'évaluation du potentiel énergétique d'un site reposent sur l'établissement d'une courbe de débits classés. Une mesure unique d'un débit instantané dans un courant a peu de valeur et n'est en aucun cas suffisante (risque de sur ou sous dimensionnement suivant la période durant laquelle la mesure a été effectuée).

La mesure de la dénivellation exige un relevé rigoureux. Les résultats obtenus en utilisant un niveau de géomètre et une mire sont assez précis, mais les récentes avancées dans les appareils de topographie électroniques rendent le travail plus simple et plus rapide.

Tracer une courbe de débits classés sur un site jaugé est facile. En revanche, pour tracer cette courbe sur un site non jaugé, une compétence en hydrologie est nécessaire. Dans le chapitre 3, différentes méthodes de mesure de débit d'un cours d'eau sont analysées et des modèles hydrauliques pour calculer le régime hydraulique sur des sites non jaugés sont présentés.

Le chapitre 4 présente les techniques telles que l'orthophotographie, les SER, les SIG, la géomorphologie, la géotectonique, etc. (utilisées de nos jours pour les évaluations de sites) qui réduisent des probabilités de difficultés ultérieures liées au terrain. Quelques-unes de ces difficultés sont analysées et des indications sur la manière dont elles auraient pu être évitées sont décrites.

Les méthodes de conception des ouvrages hydrauliques sont présentées dans le chapitre 5. Les seuils, canaux, déversoirs, prises d'eau et conduites forcées, sont étudiés en détail.

Le chapitre 6 traite des équipements électromécaniques utilisés pour transformer l'énergie potentielle hydraulique en électricité. La conception des turbines n'est pas étudiée en détail. L'accent est mis sur les différents types de turbine, en particulier pour des aménagements de basse chute, et sur le processus de sélection selon le critère de vitesse spécifique. Puisque les aménagements hydrauliques sont aujourd'hui sans surveillance, les systèmes de contrôle-commande sont également examinés.

Une évaluation de l'impact sur l'environnement doit être faite pour obtenir un droit d'eau. Bien que plusieurs études récentes aient démontré que les petites centrales hydroélectriques n'entraînant pas d'émissions ni de production de déchets toxiques, ne contribuent pas au changement climatique, les concepteurs doivent intégrer toutes les mesures nécessaires pour réduire les impacts écologiques locaux. Le chapitre 7 analyse ces impacts et les mesures de compensation.

Le chapitre 8 analyse les techniques pouvant être appliquées dans l'évaluation économique d'un aménagement. Différentes méthodes d'analyse économique sont décrites et illustrées par des tableaux représentant la marge d'autofinancement générée par l'aménagement.

Le chapitre 9 décrit toutes les procédures administratives à suivre. Malheureusement, la dérégulation récente du marché de l'électricité ne permet pas de détailler une situation pourtant claire quelques années auparavant. ESHA a produit en décembre 1994 en faveur de C.E.DGXVII, un rapport "Small Hydropower. General Framework for Legislation and Authorization Procedures in the European Union" ("Petite Hydroélectricité. Cadre Général pour la Législation et Procédures d'Autorisation dans l'Union Européenne"). Bien qu'il n'ait pas été actualisé, ce document comporte de nombreux chapitres encore valides. Le rapport est disponible sur le site Internet de l'ESHA : [www.esha.be](http://www.esha.be).

Les autres points très importants pour le promoteur sont les tarifs de vente ainsi que les procédures administratives de raccordement. Ceux-ci dépendent de la politique énergétique et du cadre institutionnel de chaque pays, une présentation d'ensemble figure dans l'Annexe A du chapitre 9.

---

<sup>1</sup> Par Celso Penche (ESHA), Francis Armand † (ADEME), Vincent Denis (MHyLab) et Christer Söderberg (SERO)