



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

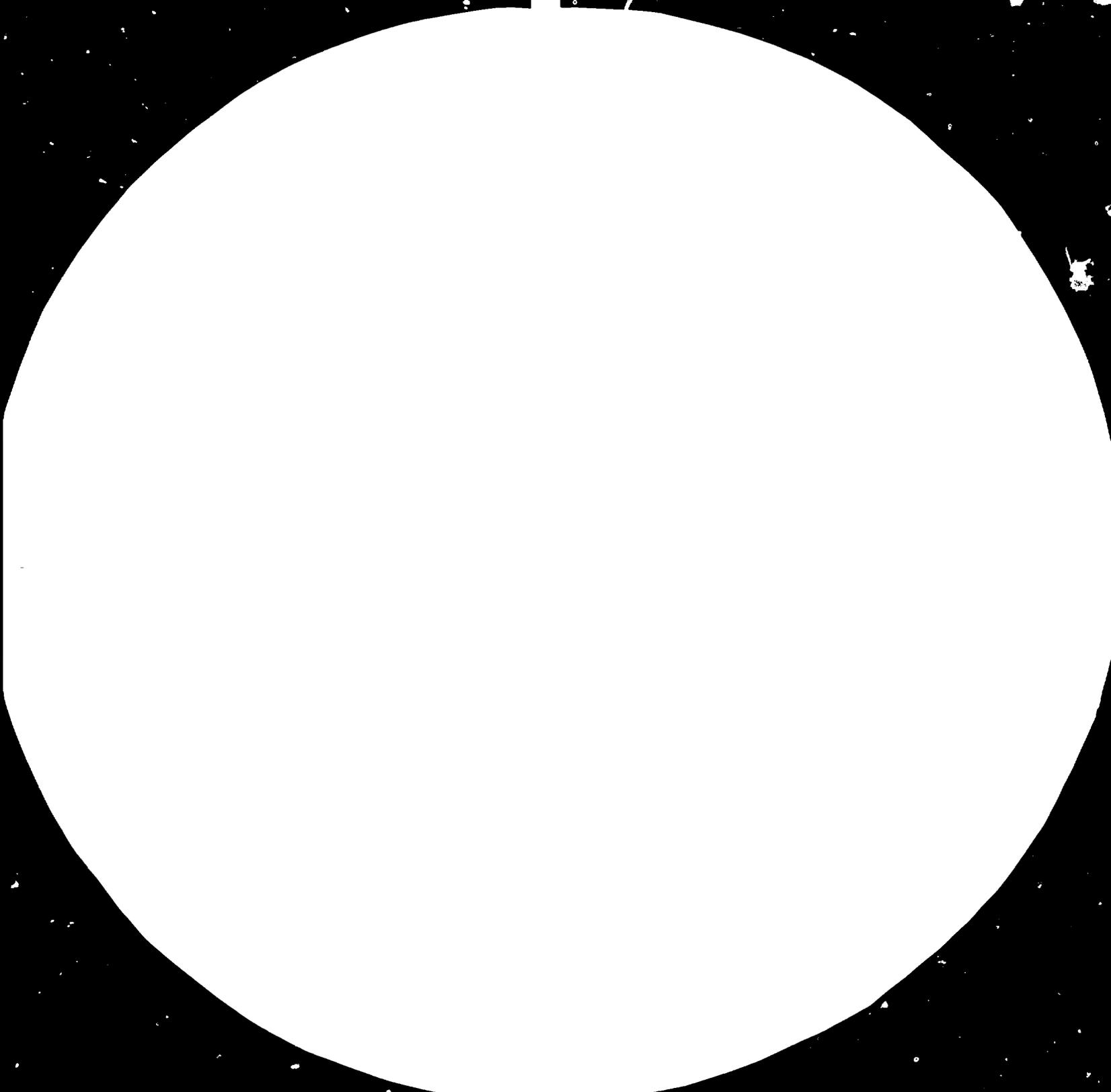
FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org





2.8



3.2



3.6



4.0



MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS-1963-A

11201-F

ORGANISATION DES NATIONS UNIES
POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL

Distr. LIMITEE
UNIDO/79.224
2 février 1982
FRANCAIS
Original: ANGLAIS

LES REALISATIONS DE MINICENTRALES HYDRO-ELECTRIQUES EN CHINE*

préparé par

le Ministère de la production des eaux,
République populaire de Chine

611

*) Edition préalable d'une publication de l'ONUDI qui doit paraître dans la série «Mise au point et transfert des techniques». Traduction d'un document n'ayant pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle.

V. 82-2440 (EX)

LES REALISATIONS DE MINICENTRALES HYDRO-ELECTRIQUES EN CHINE*

préparé par

le Ministère de la production des eaux,
République populaire de Chine

*) Edition préalable d'une publication de l'ONUDI qui doit paraître dans la série «Mise au point et transfert des techniques». Traduction d'un document n'ayant pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle.

PREFACE

Dans la décentralisation des centrales hydro-électriques, on reconnaît généralement aujourd'hui l'un des moyens potentiels et expédients de mettre en valeur les ressources énergétiques pour répondre aux besoins globaux des campagnes, de même que pour seconder les projets et programmes d'industrialisation rurale et de décentralisation industrielle dans les pays en développement.

L'ONUDI a organisé, à Hangzhou, Chine, le 17 octobre 1980 et à Manille, Philippines, du 3 au 8 novembre 1980, le «Deuxième séminaire et voyage d'étude sur la mise au point et l'application des techniques relatives aux minicentrales hydro-électriques (MCH)». L'un des ses objectifs était de promouvoir l'échange d'expériences concernant l'aménagement, la construction et l'exploitation de minicentrales hydro-électriques dans les pays en développement et, en particulier, la méthode d'aménagement et de réalisation des programmes appliquée en République populaire de Chine.

Lors de ce séminaire, les délégués chinois ont présenté un certain nombre de documents sur les minicentrales hydro-électriques, fondés sur leurs propres réalisations. De nombreux participants ont demandé à l'ONUDI de plus amples renseignements sur ce sujet. L'ONUDI a donc prié les autorités chinoises de préparer le présent document. Il a été décidé que sa première édition ne viserait pas à être parfaite, mais ferait l'objet de modifications et d'améliorations régulières, fondées sur les suggestions des lecteurs.

Ce manuel est destiné à compléter en même temps qu'à prolonger la précédente publication de l'ONUDI intitulée « Les minicentrales hydro-électriques (Manuel à l'usage des décideurs) » (publication n°UNIDO/IS. 225). Sont également signalés à l'intention du lecteur un certain nombre d'autres documents préparés à l'occasion des rencontres susmentionnées de Hangzhou et de Manille.

Le présent manuel a pu être préparé grâce à la contribution apportée par le gouvernement chinois au Fonds de développement industriel de l'ONUDI.

Son principal auteur est:

M. Guo Ruizhang,
ingénieur principal adjoint,
Bureau de la protection des eaux à Shanghai.

aidé de:

M. Zhu Xiaozhang,
ingénieur principal adjoint,
Bureau d'étude de Lanchow,
Ministère de la protection des eaux,

M. Liu Kewei,
Chef de division adjoint,
Bureau de la protection des eaux,
province de Sichuan,

M. Lu Renchao,
ingénieur,
Bureau de la protection des eaux,
province de Hunan,

M. Lee Renlin,
ingénieur,
Bureau de la protection des eaux,
province de Hunan.

Le texte a été revu par:

M. Bai Lin,
Chef adjoint de la Division
de l'énergie hydro-électrique
Ministère de la protection des eaux.

L'ONUDI espère sincèrement que le présent manuel jouera un rôle pratique et utile dans l'aménagement des minicentrales hydro-électriques dans les pays en développement.

TABLE DES MATIERES

	Page
PREFACE	i
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
1. GENERALITES	1
I. Les ressources hydro-électriques de la Chine et leur mise en valeur	1
II. Mise au point et construction des MCH	3
III. Le rôle des MCH dans l'économie sociale	4
A) Favoriser la protection des eaux pour les terres cultivées et créer ainsi les conditions d'un rapide développement de l'agriculture	4
B) Développer les industries d'arrondissement et les industries communales grâce à une énergie bon marché	4
C) Accumuler des fonds pour l'arrondissement, la commune et la brigade de production	5
D) Promouvoir le développement de l'électrification et de la mécanisation rurales ...	5
IV. Organisation, programmation, réalisation et exploitation des MCH	5
A) Organigramme administratif des MCH en Chine	6
B) Les fonctions se répartissent ainsi	7
1. Aménagement fluvial	7
2. Etude technique	7
3. Construction	7
4. Exploitation	8
5. Entretien	8
2. PRINCIPES ET DISPOSITIONS	
i. Développement des MCH grâce aux masses populaires	9
II. Sources de financement	9
III. Aménagement général et polyutilisation	9
IV. Fourniture de matières premières pour les centrales et leur équipement	10
V. Rattachement des MCH au réseau national	10

	Page
3. CONSIDERATION ECONOMIQUES	11
I. Analyse économique des MCH chinoises	11
II. Comparaison des MCH et des autres sources d'énergie	15
A) Petites centrales thermiques	15
B) Générateurs diesel	18
C) Extension du réseau	18
D) Générateurs à biogaz	19
E) Autres sources d'énergie	20
4. EXPLOITATION ET CONCEPTION	22
I. Critères de conception des MCH	22
II. Plans	27
A) Plan d'ensemble	27
B) Possibilités d'exploitation en chaîne	27
C) Répartition des grandes centrales et des minicentrales et rattachement de ces dernières au réseau	27
D) Choix de la meilleure solution du point de vue énergétique et économique	28
E) Choix d'un site présentant de bonnes conditions topographiques, géologiques et hydrauliques	30
F) Economie de matériaux de construction et disponibilité de l'équipement	30
III. Hydrologie	30
A) Généralités	30
B) Calcul de l'écoulement	31
1. Comment calculer \bar{Q}_{2a}	31
a) Méthode des isohyètes	31
i) Utilisation d'une carte des isohyètes de la hauteur (\bar{v}) ou module (\bar{M}) du débit annuel moyen	32
ii) Comment estimer l'écoulement annuel à partir d'une carte des isohyètes des précipitations	34
b) Estimation de l'écoulement annuel à partir des précipitations annuelles	34
i) Evaluation des précipitations annuelles dans le bassin considéré	34
ii) Evaluation de la série des écoulements annuels du bassin considéré	35
c) Evaluation de l'écoulement annuel de la centrale projetée à partir de celui de la station témoin (méthode d'analogie hydrologique)	36
2. Choix d'une année théorique	37

	Page
a) Volume de l'écoulement annuel	38
b) Régime de l'écoulement	38
i) Hydrogramme d'une année type	38
ii) Tracé de l'hydrogramme d'une zone sans relevés	39
3. Détermination de l'étiage en l'absence de données hydrologiques	39
C) Crues	40
1. Débit théorique maximal de la crue	40
a) Calcul du débit théorique maximal à partir des données d'observation	40
b) Calcul du débit théorique maximal par d'autres méthodes	41
i) Estimation du débit théorique maximal à partir de l'orage théorique par la méthode rationnelle	41
ii) Formule empirique	44
iii) Etude et calcul de la crue historique	45
2. Volume de la crue théorique	46
3. Hydrogramme théorique	47
i) Extension de l'hydrogramme type	47
ii) Simplification de l'hydrogramme de la crue théorique	48
D) Etablissement de la relation entre cote et débit	50
IV. Energie hydraulique	51
A) Charge électrique	51
1. Charge journalière	54
2. Diagramme de charge annuelle	54
B) Centrale au fil de l'eau	55
1. Détermination de l'énergie disponible	55
2. Energie produite au cours d'une année moyenne	55
3. Détermination de la puissance installée	56
a) Par un multiple de l'énergie disponible	59
b) Par le temps annuel d'utilisation (en heures)	60
c) Par rapport au groupe turbo-générateur type	62
C) Centrale à régulation journalière	63
1. Production d'énergie concentrée pendant quelques heures	63
2. Production périodique d'énergie	65
D) Centrale à régulation annuelle	66
V. Type de MCH et étude particulière	67
A) Centrale à barrage: dénivellation créée par le barrage	67
1. Centrale hydro-électrique servant d'ouvrage de retenue	67
2. Centrale située en aval du barrage	70
B) Centrale à dérivation: chute assurée par la conduite	77
C) Centrale «mixte»	85
D) Dispositifs divers d'exploitation de l'énergie hydraulique	87
1. Utilisation des chutes	87

	Page
2. Utilisation des rapides et cascades	87
3. Utilisation des cascades	88
4. Utilisation des coudes	91
5. Dérivation transfluviale	93
6. Utilisation des lacs d'altitude	94
7. Utilisation de l'énergie des marées	94
8. Interception des courants de fond ou captage des sources pour la production d'énergie	94
VI. Montage électrique et poste de transformateurs-eleveurs	95
5. MACHINES HYDRO-ELECTRIQUES ET LEUR MATERIEL	102
I. Ensembles turbine hydraulique-générateur	102
II. Matériels auxiliaires principaux	109
III. Livraison d'équipements complets	110
6. RECHERCHE, DEVELOPPEMENT, FORMATION, REDUCTION DES COUTS	112
I. Recherche	112
A) Utilisation de tuyaux en béton précontraint	112
1. Avantages des tuyaux en béton précontraint (BPC)	112
a) Moindre coût et moindre consommation d'acier	115
b) Durabilité	115
c) Commodité d'installation et meilleure étanchéité des joints	115
d) Faible coût d'entretien	115
2. Modèle de tuyaux en BPC	115
a) Critères	116
b) Calcul	116
3. Technique de fabrication et contrôle qualitatif	118
a) Contrôle de la contrainte longitudinale	118
b) Contrôle qualitatif des matériaux	122
c) Contrôle des proportions du mélange	122
d) Contrôle du procédé centrifuge en trois temps	122
i) Contrôle de la rotation lente	122
ii) Rotation moyenne	124
iii) Rotation rapide	124
iv) Contrôle des procédés de fabrication	125
e) Contrôle de l'enroulement métallique	125
f) Protection de l'enroulement	127
g) Essai de pression hydraulique	129
B) Installation de vannes de sécurité dans les MCH	130
1. La vanne de sécurité modèle TFW-400 à oléocommande intégrale	131
a) Détails de la vanne	132
b) Le système de commande	133

	Page
2. Stabilité et qualité du comportement en présence de transitoires	134
3. Production en série et utilisation	136
II. Progrès techniques	138
A) Résistance hydraulique	138
B) Système d'excitation sur la troisième harmonique de la tension	139
1. Viabilité économique	140
2. Bonnes caractéristiques de fonctionnement	140
3. Moins d'entretien et de réparations	140
C) Assurance de qualité et meilleure fiabilité de l'alimentation	141
III. Formation du personnel des MCH	142
IV. Réduction du coût des MCH	142
A) Barrages en terre	143
B) Barrages en maçonnerie de pierre	145
C) Barrages de construction simple	147
1. Barrages à parement en dur	147
a) Construction	147
b) Etude technique	148
c) Technique de construction	149
2. Barrages en pierres sèches	150
a) Prévention de l'infiltration	153
b) Radier	154
c) Construction des fondations	154
d) Contrôle de qualité	155
3. Barrages déversoirs en terre et enrochement	155
4. Barrages à enrochement	159

LISTE DES TABLEAUX

No.	Titre	Page
1-1	Définition des petites centrales, minicentrales et microcentrales	2
1-2	Organigramme administratif des MCH en Chine	6
3-1	Analyse technique et économique des minicentrales (à dérivation)	12
3-2	Analyse technique et économique des minicentrales (à barrage)	13
3-3	Analyse technique et économique des minicentrales (au fil de l'eau et mixtes)	14
3-4	Coût de construction d'une petite centrale thermique	16
3-5	Dépenses d'exploitation d'une petite centrale thermique	17
3-6	Production de biogaz	20
4-1	Classement des projets de protection des eaux et d'énergie hydro-électrique	23
4-2	Classement des ouvrages hydrauliques	24
4-3	Crues normales prévues par catégorie d'ouvrages permanents	25
4-4	Fréquence minimale des crues exceptionnelles prévues par catégorie d'ouvrages permanents	26
4-5	Paramètre de débit maximal q	45
4-6	Tableau donnant la valeur de $\frac{T_i}{T}$ en fonction de F	49
4-7	Normes de consommation d'énergie	52
4-8	Puissance et distance de transport pour différentes tensions	53
4-9	Tableau des valeurs de C (quotient de la puissance installée par l'énergie disponible)	60
4-10	Temps théorique d'utilisation annuelle de la puissance installée (en heures) ¹	61
4-11	Puissance installée de la chaîne de centrales sur le canal de Mimyun à Beijing	91
5-1	Numéros de série des divers types de turbines hydrauliques	104
5-2	Puissance des générateurs hydro-électriques	106
5-3	Etat de marche de certains groupes turbines-générateurs de divers types	108
5-4	Modèles de régulateurs	109
6-1	Principales caractéristiques des vannes de sécurité TFW	136
6-2	Cotes modèles d'un barrage à parement en dallage	150
6-3	Cotes modèles d'un barrage en pierres sèches	153
6-4	Cotes modèles d'un barrage du type Chaokuche	158

LISTE DES FIGURES

No.	titre	Page
4-1	Courbe de corrélation entre précipitations et écoulement	36
4-2	Hydrogramme de crue simplifié sous forme de triangle	49
4-3	Diagramme type de la charge journalière	54
4-4	Courbe journalière moyenne des débits classés	56
4-5	Régulation journalière (a)	64
4-6	Régulation journalière (b)	65
4-7	MCH de Ganxi	68
4-8	MCH de Ganxi (2)	69
4-9	Centrale hydro-électrique du „Peuple“	70
4-10	MCH de Yanwotan	71
4-11	MCH de Yanwotan (1)	72
4-12	MCH de Yanwotan (2)	73
4-13	MCH de Yunxiao	74
4-14	MCH I de Meixi	75
4-15	Plan directeur de la MCH de Meixi, tranche I	76
4-16	MCH du Double dragon	78
4-17	MCH de Baizhangtan	79
4-18	MCH de Qingtong	80
4-19	MCH de Chongshan (1)	82
4-20	MCH de Chongshan (2)	83
4-21	MCH de Qing Yuan	84
4-22	MCH de Zaixi	86
4-23	Utilisation d'un rapide	87
4-24	Disposition d'une centrale latérale à la chute	88
4-25	Plan de la centrale No. 3 sur le canal de Beijing-Mimyun	89
4-26	MCH sur le Canal de Beijing-Mimyun	90
4-27	MCH de la Voie d'eau alimentée par galerie	92
4-28	MCH du Datan	93
4-29	Barre omnibus (sans sectionneur)	96
4-30	Barre omnibus 6,3 kV (à sectionneur)	97
4-31	Bloc Générateur – Transformateur	98
4-32	Montage en „Pont“	99
4-33	Barre omnibus 10,5 ~ 38,5 kV	100

No.	Titre	Page
6-1	MCH de Huangtongjiang	113
6-2	MCH de Shiuxia	114
6-3	Dimensions du tuyau en BPC	117
6-4a	Raccordement du fil électrique à l'armature d'acier	119
6-4b	Raccordement de la soudeuse à l'arc et de l'armature	120
6-5	Elongation de l'armature au verin	121
6-6	Chargement du béton dans le moule	123
6-7	Enroulement métallique sur le noyau	126
6-8	Schéma de fonctionnement de l'enrouleuse	126
6-9	Schéma de l'installation pour traitement antirouille	128
6-10	Appareil d'essai de la pression hydraulique (schéma)	129
6-11	Schéma de la vanne de sécurité	132
6-12	Schéma du système de commande	133
6-13	Comparaison des régions de stabilité du régulateur	135
6-14	Domaine d'utilisation des diverses vannes de sécurité	137
6-15	Type de barrage en terre	144
6-16	Barrage — poids évidé de Yanwotan	146
6-17	Barrage à parement en dallage	147
6-18	Coupe d'un barrage à parement en dallage	149
6-19	Coupe d'un barrage en mœllons secs	151
6-20	Types de barrages en mœllons secs	152
6-21	Fondation au pied aval d'un barrage en mœllons secs	154
6-22	Coupe du barrage mixte de Laxia	156
6-23	Crête d'un barrage mixte	156
6-24	Coupe du barrage mixte type Chaokuche	157
6-25	Coupe d'un barrage bas (déversoir) en enrochement	159

1. GENERALITES

I. LES RESSOURCES HYDRO-ELECTRIQUES DE LA CHINE ET LEUR MISE EN VALEUR

La Chine dispose de riches ressources en énergie hydraulique, d'une puissance totale d'environ 680 000 MW, dont 370 000 aisément exploitables. Géographiquement, la Chine se divise en hautes terres à l'ouest et en basses terres à l'est. La plupart de ses fleuves prennent leur source dans les plateaux occidentaux. Les précipitations sont abondantes dans le sud et les ressources hydro-électriques y sont donc plus grandes que dans le nord, où les précipitations sont très faibles.

Depuis la libération en 1949, le Gouvernement chinois a attaché beaucoup d'importance à l'exploitation des ressources hydro-électriques et y a largement réussi. La puissance totale installée est passée de 160 MW en 1949 à 19 450 MW à la fin de 1979. Toutefois, l'énergie hydro-électrique ainsi exploitée ne se monte qu'à 5 pour cent environ des ressources totales. Le potentiel de mise en valeur future est donc extrêmement élevé.

Selon les statistiques, en 1979, l'énergie tirée du charbon était la plus importante en Chine, le pétrole venant ensuite et, enfin, l'énergie hydraulique, avec 17 pour cent seulement.

Les ressources qu'offrent les moyennes et petites rivières abondent aussi (approximativement 150 000 MW).

La définition respective des petites centrales, minicentrales et microcentrales varie selon les pays et les organisations, comme le montre le tableau suivant.

Tableau 1-1
Définition des petites centrales, minicentrales et microcentrales

Pays ou organisation		Petites centrales (kW)	Mini-centrales (kW)	Micro-centrales (kW)
ONUDI	Séminaire de Katmandou		100 - 1.000	Jusqu'à 100
	Séminaire de Hangzhou et Manille	2.001 - 10.000	101 - 2.000	Jusqu'à 100
Chine	Par station	Jusqu'à 6.000		
	Par centrale	Jusqu'à 12.000		
Philippines		Jusqu'à 5.000		
Pérou		500 - 5.000	51 - 500	5 - 50
Roumanie		5 - 5.000		
Thaïlande*			Jusqu'à 1.000	
Turquie*		1.001 - 5.000	101 - 1.000	0 - 100
Etats-Unis		Jusqu'à 15.000		
Suède		100 - 1.500		
Comité préparatoire pour la Conférence des Nations Unies sur les sources d'énergie nouvelles et renouvelables (Groupe technique de l'énergie hydraulique)		1.001 - 10.000		Jusqu'à 1.000

* Classement incertain

En fonction de la mise en valeur des campagnes chinoises, les centrales hydro-électriques d'une puissance totale installée ne dépassant pas 12 MW, ainsi que chaque station de moins de 6 MW et petit réseau local essentiellement regroupés en petites centrales hydro-électriques, sont classées avec ces centrales (SCH). Pour éviter des confusions, on a convenu de parler de mini-centrales (MCH) au lieu de petites centrales.

II. MISE AU POINT ET CONSTRUCTION DES MCH

L'énergie hydraulique est bon marché, propre et renouvelable. Depuis la libération, le Gouvernement chinois a attaché beaucoup d'importance à développer les MCH. A la fin de 1979, il en avait construit plus de 89 000, d'une puissance totale de 6 300 MW.

En 1979, les MCH produisaient annuellement 11 900 gWh, soit environ 35 pour cent de la consommation agricole (comprenant irrigation et drainage, petites manufactures communales, industries secondaires, éclairage rural, etc., à l'exclusion des industries d'arrondissement). Selon les statistiques, en 1979, sur quelque 2 000 arrondissements, 1 500 disposaient de leurs propres MCH. Sept cents environ surtout d'elles tiraient l'électricité nécessaire à l'industrie et à l'agriculture. Grâce à l'alimentation assurée par le réseau d'Etat et par les diverses MCH, 87 pour cent des communes rurales populaires, 62 pour cent des brigades de production et 50 pour cent des équipes de production utilisent déjà l'électricité.

La construction des MCH en Chine a été entreprise lors du grand mouvement national de coopération agricole qui s'est opéré au début des années cinquante. Les campagnes retardent sur le reste de l'économie. Le développement de la production industrielle et agricole exige une énorme quantité d'énergie électrique. Il était difficile de satisfaire promptement les besoins de vastes zones rurales et même impossible de le faire dans les régions écartées, par les seules grandes et moyennes centrales construites avec des crédits de l'Etat.

Pour exploiter pleinement de petites ressources hydro-électriques dispersées et utiliser en même temps l'eau à d'autres fins, on a construit des mini-centrales et assuré la distribution locale de l'électricité qu'elles produisent. Elles sont nombreuses, chacune couvrant certains secteurs et répandues dans tout le pays. Des réseaux locaux se sont ainsi formés, rattachés ensuite au réseau national. Ils devraient contribuer à satisfaire la demande d'électricité dans les régions rurales et seconder un développement accéléré de l'agriculture, avec de moindres crédits de l'Etat.

En Chine, le rythme de développement des MCH a été assez rapide et peut se diviser en trois décennies: au cours des années cinquante, la puissance totale installée n'était que de quelques milliers de kW; dans les années soixante, elle atteignait plusieurs douzaines de milliers de kW; dans les années soixante-dix, elle passait à plusieurs centaines de milliers de kW et, en 1979, elle approchait du million. Dans l'état actuel de la technique, la construction d'une MCH d'une puissance installée de plusieurs milliers de kW prend environ deux ans, de l'ouverture du chantier jusqu'à la mise en service de son premier groupe. La puissance installée de tous les projets en cours doit être plus ou triple de celle à achever dans la même année: c'est-à-dire que si la puissance totale installée est de 1 000 MW une certaine année, celle des centrales en construction la même année doit dépasser 3 000 MW.

Le coût de production est assez bas dans les MCH: environ deux à trois Fen (monnaie chinoise) le kW, alors qu'il atteint ou dépasse 10 Fen dans les petites centrales thermiques à charbon ou à mazout.

III. LE ROLE DES MCH DANS L'ECONOMIE SOCIALE

Ces dernières années, du fait de la construction massive de MCH, aussi bien les cadres que les masses ont pu voir que, si ces centrales sont de petite taille, elles sont nombreuses. Aussi jouent-elles un rôle très important. Leurs avantages sont les suivants:

A) Favoriser la protection des eaux pour les terres cultivées et créer ainsi les conditions d'un rapide développement de l'agriculture

Partout où se trouve une MCH, l'irrigation peut se développer rapidement, et on peut mieux se protéger contre l'inondation et la sécheresse. Par exemple, dans l'arrondissement d'Enping, province de Guangdong, on exploite les cascades de la Jinjiang, grâce à la construction de 130 MCH d'une puissance totale de 36 MW. L'énergie qu'elles fournissent a permis d'améliorer rapidement le drainage et l'irrigation. Actuellement, toutes les terres agricoles bordant les rives de la Jinjiang, soit une superficie de 280 000 mu, sont irriguées, et 120 000 mu de basses terres menacées précédemment par les remontées d'eau sont maintenant des superficies constamment cultivées et à haut rendement, affranchies de l'inondation et de la sécheresse.

B) Développer les industries d'arrondissement et les industries communales grâce à une énergie bon marché

Auparavant, maintes régions montagneuses étaient dépourvues d'énergie. Après la construction des MCH, diverses industries s'y sont installées: machines agricoles, ciment, engrais, papier, textile et denrées alimentaires. Par exemple, l'arrondissement de Hendong, province de Hunan, dispose grâce aux MCH d'une puissance installée de 18 000 kW. En 1979, la production annuelle d'énergie atteignait 70 gWh. L'ensemble de la production industrielle est un multiple de ce qu'il était avant l'installation des MCH.

D'autre part, ce développement de l'industrie locale hâte l'exploitation des MCH. Aujourd'hui, leurs équipements principaux proviennent des manufactures locales (gérées d'ordinaire par l'arrondissement). L'industrie locale assure aussi les travaux d'entretien et de réparation. Ainsi, le développement des MCH locales et celui de l'industrie locale vont de pair.

C) Accumuler des fonds pour l'arrondissement, la commune et la brigade de production

La minicentrale hydro-électrique Garde rouge, sur le Canal du peuple (canal d'irrigation) dans l'arrondissement de Peng, province de Sichuan, dispose d'une puissance installée de 6 400 kW et d'une recette annuelle de 1 940 000 Yuan depuis sa mise en service. La centrale du Dragon jaune, dans l'arrondissement de Wufeng, province de Hubei, dispose d'une puissance installée de 2 400 kW. Elle a été amortie en quatre ans. La centrale de Dafeishui, dans l'arrondissement de Dayi, province de Sichuan, dispose d'une puissance installée de 5 000 kW. Sa recette totale au cours des neuf dernières années a atteint 10 270 000 Yuan, soit plusieurs fois le coût de son installation.

D) Promouvoir le développement de l'électrification et de la mécanisation rurales

L'énergie fournie par les MCH enrichit et favorise la vie culturelle du peuple et hâte la construction de nouveaux villages. La population rurale y applaudit, disant: «A chaque construction d'une MCH, succède un grand progrès.»

En bref, le développement des MCH a un grand avenir en Chine. Ces centrales forment une importante source d'énergie pour moderniser les industries agricoles. Partout où l'eau abonde, les MCH peuvent fournir l'essentiel de l'énergie aux villages et bourgs de la région. En effet:

- 1) leur production est largement répartie et aisément accessible;
- 2) la technologie de leur construction est familière.

Le rythme d'accroissement de l'alimentation en énergie ne peut suivre la demande d'électricité nécessaire à l'économie sociale et à l'élévation du niveau de vie. Bien que la consommation d'énergie électrique dans les campagnes soit assez basse, on doit se souvenir que l'exploitation et la gestion des MCH font encore leurs premiers pas. Dans certaines, le potentiel de l'installation n'est pas encore entièrement utilisé, et la construction des lignes et postes qui distribuent l'énergie retarde sur celle de leur centrale. Donc, même après le lancement d'une MCH, les possibilités de transport de l'énergie en limitent la fourniture. Ces problèmes doivent être résolus dans un proche avenir.

IV. ORGANISATION, PROGRAMMATION, REALISATION ET EXPLOITATION DES MCH

A) Le tableau 1-2 présente l'organigramme d'administration des MCH en Chine.

Tableau 1-2
Organigramme administratif des MCH en Chine

Echelon	Organisme chargé de la protection des eaux	Organisme chargé des MCH
Administration centrale	Ministère de la protection des eaux	Département de la protection des eaux et des terres agricoles – Division de l'énergie hydro-électrique
Province	Bureau de la protection des eaux	Division de l'énergie hydro-électrique
Préfecture	Département de la protection des eaux	Division de l'énergie hydro-électrique
Arrondissement	Division de la protection des eaux	Section de l'énergie hydro-électrique – Société MCH

Remarque: La section chargée de l'énergie hydro-électrique dans l'arrondissement est au bas de l'échelle administrative: elle s'occupe de la conception, de la construction, de l'exploitation et de l'entretien des MCH, ainsi que de la distribution de leur électricité. De nombreux arrondissements disposent actuellement d'une puissance totale installée de 10 à 20 MW et de lignes de distribution de plusieurs centaines de kilomètres de long.

B) Les fonctions se répartissent ainsi

1. Aménagement fluvial

L'aménagement fluvial incombe à l'administration centrale, à la province, à la préfecture ou à l'arrondissement, selon la grandeur de la rivière. Si celle-ci relève de plus d'une province, les travaux d'aménagement incombent au Ministère de la protection des eaux. Si elle relève de plus d'une préfecture dans la même province, ces travaux incombent au bureau provincial de la protection des eaux. Le même principe s'applique à une petite rivière située dans l'étendue d'une préfecture ou d'un arrondissement.

Le rapport d'aménagement qui est établi doit comprendre des plans pour la mise en valeur dans un proche avenir, ainsi que dans un avenir plus éloigné, du projet à son premier stade d'exécution. L'étude préalable de faisabilité en fait partie.

2. Etude technique

Après approbation du plan d'aménagement, l'étude technique du premier stade du projet se poursuit. Pour les MCH, elle comprend habituellement deux étapes.

a) Etude préliminaire: d'ordinaire, l'étude d'un petit projet incombe à l'arrondissement. L'approbation est donnée:

- i) par la province si la puissance dépasse 500 kW (ou si la ligne de transport dépasse 35 kV);
- ii) par la préfecture ou l'arrondissement si la puissance ne dépasse pas 500 kW.

Elle se fonde principalement sur les considérations suivantes:

- i) besoins sociaux;
- ii) moyens de l'Etat, de la province ou de la collectivité locale;
- iii) avantages économiques.

b) Plans détaillés: l'arrondissement les dresse si la puissance est inférieure à 500 kW. Au-dessus, ils sont dressés par le bureau d'étude de la préfecture ou de la province.

Après approbation des plans préliminaires, la commission d'aménagement pèse sa décision d'inscrire le projet au budget de l'exercice en cours ou du prochain. Le chantier pourra alors s'ouvrir.

3. Construction

a) Une MCH d'arrondissement d'une puissance supérieure à 500 kW doit être réalisée par l'arrondissement, secondé par une équipe technique venue de la préfecture ou de la province.

b) Une MCH d'arrondissement d'une puissance inférieure à 500 kW doit être réalisée par la commune ou la brigade, secondée par une équipe technique venue de la préfecture ou de la province.

c) Sur place, la réalisation est assurée par:

l'équipe technique:	mécaniciens	venus de la
	installateurs	province ou
	monteurs des lignes	de la préfecture
la main-d'œuvre:	organisée par la collectivité locale	

4. Exploitation

Des règlements et registres d'exploitation sont en usage dans chaque MCH.

5. Entretien

L'entretien et les petites réparations incombent à l'arrondissement. La préfecture peut assurer à l'occasion une révision générale.

2. PRINCIPES ET DISPOSITIONS

Le gouvernement et les autorités compétentes ont établi pour le développement des MCH une série de principes, qui se résument ainsi.

I. DEVELOPPEMENT DES MCH GRACE AUX MASSES POPULAIRES

Les masses doivent surtout compter sur elles-mêmes pour développer les MCH. Les arrondissements, communes populaires et leurs subdivisions y sont encouragés. Le principe selon lequel «qui finance et construit une centrale la possède, la gère et en bénéficie» doit être respecté. Si plusieurs collectivités financent et construisent en commun une MCH, elle leur appartient. Ce principe a fourni plus d'une fois un moyen «plus fort, plus prompt, meilleur et plus économique» de hâter le développement des MCH.

II. SOURCES DE FINANCEMENT

Le financement (emprunts compris) viendra surtout des collectivités locales aux différents échelons, complété par des subventions du pouvoir central et de la province. Celles-ci atteignent d'ordinaire 30 pour cent de l'investissement total.

Pour donner plus d'importance aux emprunts, la Banque populaire de la province de Sichuan a mis cinq conditions à leur octroi:

- 1) L'étude technique et le budget doivent être établis et approuvés par l'autorité compétente et inscrits parmi les travaux de construction pour l'exercice en cours.
- 2) Les départements compétents doivent confirmer l'attribution des groupes ainsi que des principaux matériaux de construction.
- 3) Il doit être possible de mettre la centrale en service pendant l'exercice en cours.
- 4) L'énergie doit pouvoir être utilisée et transportée après l'achèvement de la MCH.
- 5) Un autofinancement partiel doit déjà être assuré. Si toutes ces conditions sont remplies, le prêt sera accordé.

III. AMENAGEMENT GENERAL ET POLYUTILISATION

La construction d'une MCH doit être conforme à la nature des choses. L'aménagement, la prospection géologique et l'étude technique doivent s'effectuer avec soin; les travaux de construction doivent être exactement suivis et leur encadrement renforcé pour assurer la qualité et l'efficacité.

Les plans doivent être dressés conformément à chaque système fluvial, en se fondant sur les conditions hydrologiques et géologiques et sur les besoins d'énergie. Lors de leur établissement, on doit observer le principe de l'aménagement d'ensemble et de la polyutilisation. On veillera à coordonner l'action des départements compétents et à concilier les exigences contradictoires de la production d'énergie, de la protection contre les crues, de l'irrigation, de la navigation, de la pêche et du flottage.

Le dossier du projet fera l'objet des approbations suivantes: L'étude de faisabilité et le rapport technique sur une MCH d'une puissance supérieure à 500 kW (y compris le poste et la ligne de transport correspondants) seront approuvés par le bureau ou service provincial de la protection des eaux. Si la puissance est inférieure à 500 kW, l'étude technique sera approuvée par le même service de la préfecture ou de l'arrondissement. Si le projet intéresse deux provinces, deux arrondissements, deux communes ou deux brigades, leur accord sera joint au dossier.

La MCH ne peut figurer parmi les travaux de construction pour l'exercice en cours sans l'approbation du document technique qui la concerne.

IV. FOURNITURE DE MATIERES PREMIERES POUR LES CENTRALES ET LEUR EQUIPEMENT

L'équipement des minicentrales (d'une puissance inférieure à 500 kW) est d'ordinaire fabriqué par une manufacture locale. L'Etat fournit une partie des matières premières, le reste étant fourni par la province (ou municipalité). L'équipement des centrales dont la puissance dépasse 500 kW est fabriqué et contrôlé par l'Etat conformément au plan. En Chine, pour simplifier les règles d'approvisionnement et pour hâter la construction, l'équipement de chaque MCH doit être fourni au complet par la société qui en est chargée.

V. RATTACHEMENT DES MCH AU RESEAU NATIONAL

Les MCH pourvoient par priorité à la consommation locale. Pour les faire servir pleinement et mieux garantir l'alimentation en énergie, on peut les réunir graduellement en un réseau local et même finalement les rattacher au réseau national quand les conditions nécessaires sont remplies.

Un accord de rattachement doit alors être signé et appliqué, mais la MCH continue à se gérer elle-même sur le plan technique et commercial, conformément à l'accord. Son rattachement ne change rien à son régime de propriété et d'administration. Il incombe au réseau aussi bien national que local de seconder activement le rattachement des MCH. Si le réseau se trouve interrompu, il est permis d'en retirer la MCH et de l'exploiter indépendamment.

3. CONSIDERATIONS ECONOMIQUES

I. ANALYSE ECONOMIQUE DES MCH CHINOISES

En Chine, les MCH se caractérisent ainsi du point de vue économique:

- 1) la période de construction est courte et les résultats sont rapides;
- 2) on utilise pleinement les matériaux et la main-d'œuvre locaux;
- 3) l'équipement est fabriqué dans le pays et même sur place quand la puissance ne dépasse pas 500 kW.

Dans cet immense pays, les conditions changent complètement selon la région: aussi le prix de revient d'une MCH varie-t-il beaucoup, de quelque 500 Yuan par kW à plus de 2 000. En général, pourtant, il se tient entre 1 000 et 1 300 Yuan.

Les tableaux 3-1, 3-2 et 3-3 donnent les caractéristiques techniques et économiques de 25 MCH construites au cours des années soixante et soixante-dix dans les provinces de Zhejiang, Guangdong, Hunan, Jiangxi et Sichuan, ainsi que dans la région autonome de Guangxi Zhuang (la hauteur de chute varie de 4,5 à 612 mètres et la puissance installée de 150 à 12 000 kW).

Le coût global se répartit quelque peu différemment selon la longueur des lignes. En général, il s'établit comme suit: génie civil de 42 à 65 pour cent; équipement de 31 à 48 pour cent; lignes de transport de 4 à 14 pour cent.

Tableau 3-1
Analyse technique et économique des minicentrales (à dérivation)

Nom	Lieu (province)	Type	Débit prévu en MCS	Débit maximal prévu en MCS	Hauteur moyenne de chute en mètres	Puissance totale installée kW	Coût total (10 ⁴ Yuan)	Utilisation annuelle moyenne (heures)	Coût du kW (Yuan)	Coût du kWh (Yuan)	Coût de l'énergie produite (en Fen/kWh)
Zhangwangmiao	Jiangxi	Dérivation	64	10	8,44	2 x 1250	478	4800	950	0,19	2,61
Yongan	Sichuan	Dérivation	63	11	10,0	3 x 1250 3 x 250	665,088	7989	1498	0,19	1,194
Tonglienyen	Jiangxi	Dérivation	9,88	22,9	22,4	1760	130	4215	730	0,28	2,5
Tongkouqi	Zhejiang	Dérivation	4,0	48,4	46,9	2 x 800	166,1	2000	1038	0,27	3,8
Yaqi	Zhejiang	Dérivation	11	51,6	50,4	4450	650	3120	1460	0,46	1,0
Tangshaoshui	Jiangxi	Dérivation	2,5	56	55	1 x 200 1 x 800	110,3	4716	1100	0,24	3
Minyangkuan	Jiangxi	Dérivation	4,2	76	75	2 x 1250	266	3670	1064	0,27	2
Tongyuan II	Jiangxi	Dérivation	3,6	80	80	2 x 630	109	2822	860	0,27	2,5
Kenghuang	Zhejiang	Dérivation	0,32	94,6	93,6	200	19,83	2500	992	0,4	3,8
Xixiankou	Guangxi Zhaung Reg. Auto	Dérivation	3	132	130	2 x 1600	260	3150	813	0,26	2,5
Datian	Zhejiang	Dérivation	1	181	181	3 x 400	87,5	5000	729	0,146	2,5
Chongshan	Hunan	Dérivation	0,6	210	210	4 x 250	87,66	3360	876,6	0,26	3
Jiangkou	Hunan	Dérivation	0,28	612	612	2 x 500	84	1200	840	0,11	1,5

Tableau 3-2
Analyse technique et économique des minicentrales (à barrage)

Nom	Lieu (province)	Type	Débit prévu en MCS	Débit maximal prévu en MCS	Hauteur moyenne de chute en mètres	Puissance totale ins- tallée kW	Coût total (10 ⁴ Yuan)	Utili- sation annuelle moyenne (heures)	Coût du kW (Yuan)	Coût du kWh (Yuan)	Coût de l'énergie produite (en Fen/kWh)
Yangtang	Hunan	*	6,8	5,5	4,5	6 x 1500 4 x 252	2090	4334	2090	0,484	1,2
Qingshan	Zhejiang	*	21,8	13	10,9	4 x 500	205	2500	1025	0,34	1
Dalongdong	Guangdong	*	12	25	20	2000	238,9	4380	1195	0,27	2
Maoqi	Hunan	*	20	45	36	4 x 1250	761	3920	842	0,2	1,2
Yangwotan	Hunan	*	12	50	43,75	1 x 3200 2 x 3000	80				
Kaofeng II	Hunan	*	44 x 0,48	136	136	4 x 500	321,9	5450	556	0,102	2,1
Kaofeng I	Hunan	*	3 x 0,77	219	202,5	3 x 1250					

* Usine au pied aval du barrage.

Tableau 3-3
Analyse technique et économique des minicentrales
(au fil de l'eau et mixtes)

Nom	Lieu (province)	Type	Débit prévu en MCS	Débit maximal prévu en MCS	Hauteur moyenne de chute en mètres	Puissance totale installée kW	Coût total (10 ⁴ Yuan)	Utilisation annuelle moyenne (heures)	Coût du kW (Yuan)	Coût du kWh (Yuan)	Coût de l'énergie produite (en Fen/kWh)
Chenjiang	Zhejiang	Au fil de l'eau	10,8	4,5	4,25	4 x 75	40,6	5500	1353	0,24	3
Xutang	Zhejiang	Au fil de l'eau	3,9	5,7	5,5	2 x 75	27,63	5225	1841,9	0,36	1,9
Chenguan	Hunan	Au fil de l'eau	13,68	5,125	4,125	8 x 500	551,47	6150	1400	0,207	2,5
Ganqi	Hunan	Au fil de l'eau	16,9	11,6	10,5	10 x 1250	2005,3	6150	1600	0,26	0,9
Tongkengqi	Zhejiang	Mixte	0,5	150	136	2 x 500	99	3500	990	0,33	4,83
Tongbai	Zhejiang	Mixte	3,4	310	300	2 x 4000	1250	4144	1563	0,3	2,5

II. COMPARAISON DES MCH ET DES AUTRES SOURCES D'ENERGIE

La Chine est très étendue et dispose de sources d'énergie très variées. Selon les besoins énergétiques reconnus, il faut alimenter d'abord l'agrotechnique. Une comparaison s'opère alors entre les diverses catégories d'énergies exploitables. Priorité est donnée aux sources bon marché et de bonne qualité disponibles sur place. Il vaut mieux que l'électrification rurale soit assurée par les ressources énergétiques du crû.

La comparaison économique entre les diverses variantes porte à la fois sur l'investissement global et sur le coût annuel d'exploitation. Actuellement, on procède d'habitude par la méthode dite du temps de compensation. Quand l'investissement global Z_1 de la variante 1 dépasse l'investissement global Z_2 de la variante 2 et que le coût annuel d'exploitation F_1 de la variante 1 est moindre que le coût annuel d'exploitation F_2 de la variante 2, on peut les comparer en calculant le temps de compensation N (en années) par la formule:

$$N = \frac{Z_1 - Z_2}{F_2 - F_1} \quad (1)$$

Ce temps obtenu, on doit tenir compte d'autres facteurs comme l'existence d'une source d'énergie locale, la position technique et la capacité économique du bailleur, etc. Le temps N est d'ordinaire de 10 ans.

En Chine, l'électrification rurale peut se faire aussi par:

- 1) de petites centrales thermiques ou des générateurs diesels;
- 2) une extension du réseau régional ou national existant.

On peut encore envisager d'utiliser le biogaz, l'énergie géothermique et l'énergie éolienne en certains lieux, selon les conditions locales.

A) Petites centrales thermiques

Les tableaux 3-4 et 3-5 donnent, respectivement, le coût de construction et les dépenses d'exploitation d'une petite centrale thermique (statistiques des années soixante).

Tableau 3-4
Coût de construction d'une petite centrale thermique

Puissance (kW)	Coût					Coût (Yuan/kW)
	Total (unité: 10 000 Yuan)	Répartition				
		Equipe- ment %	Génie civil %	Instal- lation %	Divers %	
2 x 750	150	65	17	10	8	1000
2 x 1500	270	60	24	8	8	900
2 x 3000	504	60	24	8	8	840
2 x 6000	876	58	26	8	8	730

Tableau 3-5
Dépenses d'exploitation d'une petite centrale thermique

Puissance (kW)	Amortissement et coût du matériel et des pièces détachées (Yuan/kW)	Salaires et frais généraux (Yuan/kW)	Effectif (hommes/MW)	Consommation interne d'énergie (%)	Consommation de charbon (kg/kWH)	Coût (Yuan/kW)	Utilisation annuelle maximale (heures)	Coût de l'énergie produite (Yuan/kWH)
1 x 750	97,3	47,3	70	14 - 15	1,17	1200	1500 - 2000	0,144 - 0,120
1 x 1500	87,5	40,6	60	11 - 12	0,875	1080	2000 - 2500	0,099 - 0,086
1 x 3000	81,8	30,4	45	10 - 11	0,625	1010	2500 - 3000	0,069 - 0,062
1 x 6000	71,0	16,9	25	8 - 9	0,578	876	3000 - 3500	0,051 - 0,047

D'ordinaire, les petites centrales thermiques rurales se construisent près du bourg ou du lieu où le combustible abonde et où les ressources hydrauliques manquent ou sont loin du réseau central.

On construira une centrale thermique sur un gisement de charbon ou à brève distance de la houillère et du centre distributeur. La pénurie de houille, ou son transport à longue distance, renchérit considérablement la production d'énergie.

L'exploitation et la gestion sont plus complexes que pour les MCH. L'énergie produite est plus chère (de 9 à 15 Fen/kWH) et dépend aussi des prix du charbon. La centrale thermique s'adapte mal aux variations de charge. Le risque de pollution peut être grand. Il doit être tenu compte de tous ces facteurs contraires avant de construire une petite centrale thermique.

L'exploitation d'une MCH économise le charbon et fournit de l'énergie à bon marché. Une centrale hydro-électrique disposant d'une puissance régulatrice peut contribuer notablement à satisfaire la demande pendant les périodes de charge maximale. Son défaut est de manquer de puissance en saison sèche, qu'on peut pallier par la construction de petites centrales thermiques. Ainsi, cette construction, dans un réseau en développement formé surtout de centrales hydro-électriques, peut compenser leur manque de puissance en saison sèche et régulariser ainsi l'alimentation.

B) Générateurs diesel

En Chine, les générateurs diesels sont d'ordinaire de faible puissance (moins de 100 kW). Ils ont été surtout construits dans les bourgs et dans les petites fabriques, mines et autres entreprises. Construire une centrale diesel revient meilleur marché (entre 500 et 600 Yuan/kW) et sa propre consommation est faible. La mise en route et l'arrêt sont assez simples et n'exigent qu'un petit nombre d'opérateurs. Toutefois, la consommation de mazout renchérit la production. L'exploitation et la gestion exigent aussi une technique poussée. En conséquence, on ne doit envisager de centrale diesel que si la charge est faible, si la mine ou le réseau sont loin du centre distributeur et s'il n'existe pas de source d'énergie hydraulique, ou encore s'il s'agit d'un expédient assurant une source d'énergie intérimaire.

C) Extension du réseau

L'alimentation par le réseau régional ou national existant peut être plus sûre et de meilleure qualité car ces réseaux disposent d'une puissance suffisante pour l'électrification des campagnes. Elle s'adapte donc plus facilement aux rapides augmentations de la demande. Si l'on compare la construction d'une nouvelle MCH et la nécessaire extension des lignes du réseau régional ou national, en excluant le coût de construction de la centrale qui l'alimente déjà, on constate que l'alimentation par le réseau revient meilleur marché. Donc, dans les campagnes en grand besoin d'électrification, qui sont proches d'un réseau mais dénuées de ressources hydrauliques, l'alimentation doit se faire par extension de ce réseau. Aujourd'hui, toutefois, faute d'un réseau

de puissance suffisante, il est difficile de satisfaire dans un proche avenir ces besoins dispersés. De plus, l'électrification des villages lointains exige de longues lignes de transport, et la construction de centrales grandes ou moyennes demande de la part de l'Etat de plus gros investissements que les MCH. Cette construction prend aussi plus de temps. En bref, les MCH ont pour avantages propres une pleine utilisation de ressources hydrauliques dispersées, leur faculté d'alimenter des villages épars et celle de permettre d'utiliser l'eau à des fins multiples, tous avantages qui devraient encourager les collectivités locales aux différents échelons à développer les MCH dans la limite de leurs moyens. Les investissements de l'Etat s'en trouveraient réduits, et la moindre durée de construction donnerait des résultats plus prompts. Mieux vaut donc, quand on dispose d'énergie hydraulique, construire des MCH pour électrifier les villages. Par là, on allège la charge du réseau et on satisfait à bref délai la demande d'électricité.

Il est recommandé, pour utiliser pleinement l'énergie hydro-électrique, de relier les MCH à un réseau ou de les rattacher au réseau régional ou national. Ce rattachement favorise une alimentation ininterrompue en énergie au service de la production agricole.

D) Générateurs à biogaz

Les statistiques montrent que le coût d'une installation à biogaz est moindre que celui d'une MCH: seulement de 400 à 500 Yuan le kW. L'équipement et la technique sont assez simples, et la plupart des communes ou brigades y sont aptes. Toutefois, la production de biogaz dépend de conditions telles qu'une bonne isolation (la température doit toujours dépasser 9° C) et la disposition de matières premières. Dans certaines campagnes, le biogaz sert présentement à cuisiner, mais ne fournit guère d'énergie. En quelques lieux seulement fonctionnent des générateurs à biogaz, de faible puissance, d'ordinaire entre plusieurs kW et quelques dizaines.

Le biogaz est un gaz inflammable formé surtout de méthane et produit par fermentation de déchets organiques sous l'action de bactéries anaérobies dans certaines conditions de température, d'acidité, d'alcalinité et à l'abri de l'air. Il comprend d'ordinaire de 55 à 70 pour cent de méthane (4) et c'est un bon combustible gazeux.

Le tableau 3-6 donne une estimation de la production de biogaz à partir de diverses matières.

Tableau 3-6
Production de biogaz

Matières premières	Production journalière (m ³)
De 40 à 50 kg de fumier de porc	0,2
Un tas de fumier de buffle	1 - 1,4
0,5 kg de hareng frais	0,3
0,5 kg de fourrage	0,12

Actuellement, les générateurs à biogaz sont d'ordinaire des moteurs diesels modifiés par simple montage d'un mélangeur de biogaz sur l'admission d'air. Ils marchent aussi bien au gaz-oil qu'au biogaz. Avec du biogaz, il ne faut qu'un peu de gaz-oil pour le démarrage. La consommation de ce dernier carburant augmente naturellement quand le biogaz ne suffit pas ou quand son approvisionnement s'interrompt.

E) Autres sources d'énergie

En dehors des sources susmentionnées, on trouve encore les énergies d'origine géothermique, solaire et éolienne, qui toutes en sont encore au stade des essais.

En Chine, on a construit un groupe de stations souterraines qui expérimentent la production d'électricité par l'énergie géothermique. La température de l'eau y est inférieure à 100° C. Actuellement, deux procédés servent à produire cette énergie:

- 1) l'ébullition de l'eau à basse température et
- 2) l'augmentation de pression avec expansion de volume.

La production d'électricité solaire en Chine en est encore au stade expérimental. Elle est de deux types: l'une convertit l'énergie solaire en énergie thermique, puis l'énergie mécanique en électricité; l'autre produit directement de l'électricité à partir de l'énergie solaire, au moyen de batteries.

L'énergie électrique d'origine éolienne convient mieux aux herbages, aux pâtures, aux îles littorales et aux régions montagneuses éloignées battues des vents. Une génératrice éolienne a été montée sur une île littorale où elle sert à dessaler l'eau de mer.

La qualité et la quantité de l'énergie d'origine solaire et éolienne produites dépendent de conditions naturelles et ne sont donc pas très stables. Pour y remédier, il faudrait prévoir un dispositif d'emmagasiner (accumulateurs par exemple), fort onéreux.

4. EXPLOITATION ET CONCEPTION

I. CRITERES DE CONCEPTION DES MCH

Les centrales hydro-électriques et leurs ouvrages doivent être classés conformément à la norme (règles de classement et de conception des travaux de protection des eaux et d'énergie hydro-électrique) (norme SDJ 12-78 dans les régions de montagnes et de collines).

Dans la conception des ouvrages hydrauliques, on doit observer non seulement cette norme, mais encore le cahier des charges applicable à la conception de ces ouvrages. Dans la région des séismes, on se conformera aussi à la norme SDJ 10-78 concernant l'effet des secousses sismiques sur les ouvrages hydrauliques.

Les tableaux 4-1, 4-2, 4-3 et 4-4 sont donnés à titre d'information.

Tableau 4-1
Classement des projets de protection des eaux
et d'énergie hydro-électrique

Catégorie	Taille	Classement				
		Capacité brute de la retenue (10 ⁶ m ³)	Protection contre les crues		Zone irriguée (10 ³ mu)	Puissance installée (MW)
			Ville et région industrielle ou minière	Terres agricoles (10 ³ mu)		
I	Grande (1)	> 1000	Très grande ville ou zone industrielle ou minière	> 5000	> 1500	> 750
II	Grande (2)	1000 - 100	Grande ville ou zone industrielle ou minière	5000 - 1000	1500 - 500	750 - 250
III	Moyenne	100 - 10	Ville ou zone industrielle ou minière moyenne	1000 - 300	500 - 50	250 - 25
IV	Petite (1)	10 - 1	Bourg ou petite zone industrielle ou minière	< 300	50 - 5	25 - 0,5
V	Petite (2)	1 - 0,1			< 5	< 0,5

Tableau 4-2
Classement des ouvrages hydrauliques

Catégorie de projets	Catégorie d'ouvrage permanents		Ouvrage temporaire
	Gros ouvrage	Petit ouvrage	
I	1	3	4
II	2	3	4
III	3	4	5
IV	4	5	6
V	5	5	

Tableau 4-3
Crues normales prévues par catégorie d'ouvrages permanents

Catégorie d'ouvrages	1	2	3	4	5
Durée de retour des crues (années)	2000 - 500	500 - 100	100 - 50	50 - 30	30 - 20

Tableau 4-4
Fréquence minimale des crues exceptionnelles prévues par
catégorie d'ouvrages permanents

Type de barrage	Catégorie d'ouvrage				
	1	2	3	4	5
	Durée de retour (années)				
Barrage en terre, barrage en enrochement, barrage en moellons secs	10.000	2.000	1.000	500	300
Barrage en béton, barrage en maçonnerie et autres barrages	5.000	1.000	500	300	200

II. PLANS

Dans les plans d'une MCH, il faut surtout en choisir le type, déterminer le lieu et le calendrier de construction, décider de la taille, choisir en gros le genre d'ouvrages et leur disposition, comparer les variantes possibles pour les lignes de transport et de distribution et établir les devis.

Les principaux points à examiner sont les suivants:

A) Plan d'ensemble

Conformément au principe de la planification d'ensemble et d'une domestication générale des ressources, une enquête de caractère général doit être menée sur l'énergie hydraulique disponible en liaison avec l'état de développement de l'industrie et de l'agriculture locales ainsi que sur le besoin d'électrification. A cet effet, une certaine coordination s'impose entre les divers services compétents, et il convient aussi d'estimer le volume d'eau disponible et sa période d'utilisation. Il y a lieu encore de considérer dans leur ensemble les divers usages possibles du barrage, dont maîtrise des crues, irrigation, production d'énergie, navigation, adduction d'eau à usage industriel et ménager et pêche.

B) Possibilités d'exploitation en chaîne

«L'exploitation en chaîne» se fonde sur les conditions hydrologiques, topographiques et géologiques, sur la répartition des terres agricoles, les ressources minérales, les pertes lors du captage et d'autres facteurs techniques et économiques. Par une analyse et une comparaison d'ensemble, on choisit le projet qui se classe en tête et on en détermine le premier stade. En général, une centrale avec barrage de retenue est préférable pour la première chute en amont, car le courant ainsi régularisé peut améliorer la production d'énergie, l'irrigation, la navigation et l'adduction d'eau.

C) Répartition des grandes centrales et des minicentrales et rattachement de ces dernières au réseau

Les petites centrales des régions rurales fournissent surtout de l'électricité pour la transformation des produits de l'agriculture, l'irrigation et le drainage, aussi bien que pour l'éclairage. Les grandes centrales alimentent les industries gérées par les communes populaires ou les arrondissements, ainsi que les grandes stations de drainage et de pompage électriques. Pour mieux assurer l'alimentation, il est bon de former un réseau local qui relie les MCH, ou de rattacher ce réseau au réseau national pour accroître l'énergie distribuée et augmenter la puissance. Avec un réseau, les diverses sources d'énergie électrique se complètent mutuellement.

Si les conditions le permettent, on peut exploiter une MCH de façon qu'elle fournisse au réseau une puissance réactive et améliore ainsi la qualité de l'alimentation.

D) Choix de la meilleure solution du point de vue énergétique et économique

Fiabilité et économie sont les conditions fondamentales de tout projet. Dans l'établissement des plans des centrales hydro-électriques, les caractéristiques économique-énergétiques servent à en mesurer la faisabilité.

Les principales caractéristiques énergétiques sont l'énergie disponible N_g , la puissance installée N_i , la production d'une année moyenne E_a , etc.

Les principales caractéristiques économiques sont l'investissement, les coûts d'exploitation, le profit, etc.

Outre le coût total, certains coûts unitaires servent habituellement à comparer les investissements: par exemple, coût du kW, coût du kWh, coût annuel d'exploitation, y compris amortissement des ouvrages et des installations, dépenses de révision et réparation, dépenses d'entretien, frais généraux et salaires.

Un projet de protection des eaux et de production d'énergie hydro-électrique à fins multiples présente des avantages divers, tels que maîtrise des crues, irrigation, navigation, flottage, etc. Tous ces avantages doivent être considérés dans leur ensemble.

Le revenu net tiré de la production d'énergie peut se formuler ainsi:

$$X_N = \sum S_{Ni} E_i \quad (\text{Yuan/année}) \quad 2)$$

où S_{Ni} désigne la recette nette par kWh (en Yuan/kWh)
c'est-à-dire le prix de vente du kWh moins son
coût de production.

L'indice i désigne les différents usagers (le tarif de vente n'est pas le même pour l'agriculture et l'industrie).

E_i désigne la puissance fournie aux usagers au cours
d'une année moyenne (en kWh/an).

Si un projet de production d'énergie hydro-électrique sert à plusieurs usages, comme adduction d'eau aux industries et aux ménages et pêche, ses avantages se calculent selon les conditions concrètes.

Le coût de construction s'amortit selon la formule

$$T_R = \frac{T_e}{XN} \quad (\text{année}) \quad 3)$$

où T_e désigne l'investissement total
 XN désigne la recette annuelle nette.

Actuellement, on fixe d'ordinaire entre 5 et 7 ans la durée de l'amortissement T_R , qui ne dépasse jamais 10 ans.

Ce paramètre T_R ne sert qu'à la conception générale. Il ne saurait montrer la faisabilité d'un investissement supplémentaire. Par exemple, dans une centrale de haute chute et faible débit, une augmentation du débit pourrait sensiblement accroître la production d'énergie, de sorte qu'on étudie d'ordinaire la faisabilité de variantes comme la dérivation transfluviale. Dans ce cas, l'amortissement du coût supplémentaire de la dérivation vient en comparaison. Il se calcule ainsi :

$$\Delta T_R = \frac{\Delta T_e}{\Delta XN} \quad (\text{année}) \quad 4)$$

où ΔT_R désigne la période d'amortissement du coût supplémentaire (année)
 ΔT_e désigne le coût supplémentaire (Yuan)
 ΔXN désigne la recette supplémentaire nette par an (Yuan/an)
pour ΔT_R on prend en général 10 ans.

E) Choix d'un site présentant de bonnes conditions topographiques, géologiques et hydrauliques

Pour dresser les plans d'une centrale, le choix du lieu et de la disposition du barrage, des ouvrages d'aménée, de l'usine ainsi que du poste de transport et de distribution présente une grande importance et dépend essentiellement des conditions topographiques, géologiques et hydrauliques.

On veillera donc à choisir un emplacement particulièrement favorable.

F) Economie de matériaux de construction et disponibilité de l'équipement

Dans les plans, pour économiser de l'acier, des bois d'œuvre, du ciment, etc., mieux vaut prévoir d'utiliser pleinement les matériaux disponibles sur place. Pour la fourniture de l'équipement, on donnera de même priorité aux fabricants locaux.

III. HYDROLOGIE

A) Généralités

Actuellement, la Chine a déjà créé plus de 17 000 stations hydrologiques diverses. Sur ce nombre, 2 900 sont des stations types réparties principalement sur les fleuves, 11 pour cent seulement étant situées sur des rivières. Les MCH étant surtout construites sur des rivières, on manque souvent de données hydrologiques à leur sujet. En général, l'étude hydrologique se fait sur place, de même que les calculs nécessaires, à l'aide d'annuaires hydrologiques. Ces annuaires contiennent les données hydrologiques ainsi que les paramètres statistiques pertinents (exprimés en isolignes ou graphiques), avec des formules et des exemples d'application. Faute de données, ils sont très utiles pour calculer l'écoulement et les crues des cours d'eau pour les petits et moyens ouvrages envisagés.

En général, pour les MCH d'une puissance supérieure à 500 kW, l'étude technique doit comprendre une analyse hydrologique; pareille analyse n'est pas nécessaire pour celles de moins de 500 kW.

Dans la conception des MCH rurales, cette analyse sert surtout à fournir:

1. des données sur l'écoulement pour calculer l'énergie hydraulique;
2. des données sur les crues pour la conception du barrage;
3. les cotes des hautes et basses eaux pour la conception de l'usine;
4. des données sur les cotes atteintes par les crues pour la conception des ouvrages qui enjambent les canaux d'aménée.

B) Calcul de l'écoulement

Si l'on dispose sur plus de 15 ans de données d'observation qui traduisent la suite tant habituelle que variable des années de hautes, moyennes et basses eaux avec la fréquence voulue au point choisi, on peut calculer directement la fréquence. Avec une dizaine d'années d'observations, il faut d'abord extrapoler la série avant ce calcul. Si on ne dispose que de six ou sept ans d'observations, on peut encore s'en servir pour extrapoler. Si les données ne portent que sur deux ou trois ans ou même manquent totalement, mieux vaut procéder par analogie. On choisit alors un bassin voisin présentant des conditions géographiques naturelles analogues et pour lequel on dispose d'une assez longue série de données. Cette série est appliquée au projet par transposition. Si on dispose seulement de données sur les précipitations, on peut calculer l'écoulement à partir de ces données. Dans ce cas, on devra se souvenir qu'une bonne relation existe entre les deux quand la moyenne annuelle des précipitations est d'environ 1 500 MM et que le coefficient annuel moyen d'écoulement dépasse 0,5. Sur des terres arides, où l'évaporation est forte, précipitations et écoulement peuvent cesser de varier de façon correspondante. Leurs relations deviennent alors incertaines.

Les données hydrologiques manquent d'ordinaire pour les moyennes et petites rivières. On peut se servir d'une carte des isohyètes ou de paramètres statistiques obtenus par analyse des données d'une région analogue voisine et en tirer les caractéristiques de la fréquence. En général, on trouve dans l'annuaire hydrologique de la région le coefficient de variation C_v au centre de gravité du bassin considéré, dont on tire le coefficient d'asymétrie C_s . Ainsi, en l'absence de données hydrologiques, le calcul du débit annuel moyen \bar{Q}_{aa} sert de base pour tracer la courbe des débits classés.

1. Comment calculer \bar{Q}_{aa}

a) Méthode des isohyètes

La carte des isohyètes se dresse à partir de la répartition géographique des valeurs hydrologiques caractéristiques (débit annuel, coefficient de variation C_v , etc.). Elle se fonde sur le traitement et l'analyse de données nombreuses. Elle s'obtient en portant sur un graphique les valeurs hydrologiques caractéristiques à diverses stations. Chacune de ces valeurs peut par commodité faire l'objet d'une carte des isohyètes.

- i) Utilisation d'une carte des isohyetes de la hauteur (\bar{y}) ou du module (\bar{M}) du débit annuel moyen

A partir des données d'observation sur la zone de drainage, dont la station hydrologique opère les relevés et dresse les bilans, on peut tracer une carte des isohyetes de la hauteur \bar{y} du débit annuel moyen. A défaut de station proche du lieu envisagé, on peut calculer cette hauteur à partir de la carte des isohyetes. Si le bassin de drainage est peu étendu et si les isohyetes sont plates, on peut prendre cette cote au centre de gravité du bassin pour débit annuel moyen de l'ensemble. Sinon, il faut diviser le bassin en plusieurs aires et calculer sa cote par pondération des aires et des isohyetes au moyen de la formule suivante:

$$\bar{y} = \frac{\bar{W}_a}{F \times 10^6} \times 10^3 = \frac{\bar{W}_a}{1.000 F} \text{ (MM)} \quad 5)$$

où F désigne la superficie du bassin en km^2
 \bar{W}_a désigne le volume du débit annuel moyen en m^3 .

Avec \bar{y} , on calcule le débit annuel moyen à la centrale projetée:

$$\bar{Q}_{aa} = \frac{\bar{W}_a}{31,5 \times 10^6} = \frac{1.000 \bar{y} \cdot F}{31,5 \times 10^6} = \frac{\bar{y} \cdot F}{31,5 \times 10^3} \text{ (CMS)} \quad 6)$$

De même, avec la carte des isohyetes donnant le coefficient de variation C_v de l'écoulement annuel, on obtient ce coefficient au centre de gravité du bassin versant, d'où on tire par analyse le coefficient d'asymetrie C_s . Dans la table des facteurs modulaires K_p de la courbe de Pearson type III, on trouve pour la fréquence considérée la valeur de ce coefficient, qui sert aux calculs. Le débit annuel moyen correspondant à cette fréquence se calcule alors par la formule:

$$Q_{aap} = \bar{Q}_{aa} \times K_p = K_p \times \frac{\bar{y} \cdot F}{31,5 \times 10^3} \quad (\text{MCS}) \quad 7)$$

De la même façon, on calcule le débit annuel moyen correspondant aux diverses fréquences. Enfin, on établit la courbe annuelle théorique des débits classés.

En Chine, la carte des isohyètes donnant le module d'écoulement annuel moyen se trouve dans l'annuaire hydrologique établi par les provinces. Le débit annuel moyen fourni par kilomètre carré de bassin versant est appelé module \bar{M} de l'écoulement annuel moyen, donné par la formule:

$$\bar{M} = \frac{\bar{Q}_{aa}}{F} \times 10^3 \quad (\text{li/sec/km}^2) \quad 8)$$

où F est exprimé en km^2
et \bar{Q}_{aa} en 10^3 li/sec

ou encore par la formule

$$\bar{Q}_{aa} = \frac{\bar{M} F}{1.000} \quad (\text{MCS}) \quad 9)$$

Si l'on dispose de cartes des isohyètes donnant \bar{Y}_p (hauteur de l'écoulement annuel avec sa fréquence) et M_p (module de l'écoulement annuel avec sa fréquence), on peut trouver directement le volume de l'écoulement annuel correspondant à la fréquence considérée. Par exemple, si l'on veut connaître au moyen d'une telle carte l'écoulement annuel présentant la probabilité choisie, on peut déterminer d'abord la hauteur Y_g et le module M_g d'un écoulement annuel de fréquence déterminée au centre de gravité du bassin versant. La formule suivante sert à calculer quel sera à la centrale le débit annuel moyen présentant la probabilité choisie:

$$Q_{aag} = \frac{Y_g \cdot F}{31,5 \times 10^3} \quad (\text{MCS})$$

$$Q_{aag} = \frac{M_g \cdot F}{1.000} \quad (\text{MCS}) \quad 10)$$

ii) Comment estimer l'écoulement annuel à partir d'une carte des isohyetes des précipitations

A défaut d'une carte des isohyetes de l'écoulement, on peut calculer le débit annuel moyen à la centrale avec une carte des isohyetes des précipitations. La formule s'écrit

$$\bar{Q}_{aa} = \frac{10^3 \alpha \bar{\chi}_a F}{31,5 \times 10^3 \times 10^3} = \frac{\alpha \bar{\chi}_a F}{31,5 \times 10^3} \quad (\text{MCS}) \quad 11)$$

où $\bar{\chi}_a$ = précipitation annuelle moyenne (mm), tirée de la carte

α = coefficient d'écoulement, qui dépend du volume et de l'intensité des pluies, de la topographie du bassin, de l'évaporation, de la conservation des sols et des eaux, etc. Ce coefficient varie beaucoup, de moins de 0,2 à plus de 0,6.

Dans les plaines dont le sol est bon, où l'eau se conserve bien en même temps que se produisent une forte évaporation et une forte infiltration, la théorie propose pour ce coefficient une faible valeur, alors qu'en pratique on prend une valeur plus grande. Sa valeur exacte étant malaisée à déterminer, on peut l'estimer selon la formule (14).

Les cartes des isohyetes figurent dans les annuaires hydrologiques publiés par les provinces ou les préfectures. On tiendra compte de leur domaine et conditions d'application. Si la zone de drainage est peu étendue, l'influence des facteurs non régionaux s'accroît et donc l'usage de la carte des isohyetes peut entraîner des erreurs.

b) Estimation de l'écoulement annuel à partir des précipitations annuelles

La méthode des isohyetes susmentionnée est simple. Toutefois, il est parfois difficile de se servir de l'annuaire hydrologique, ou bien on dispose d'autres données depuis sa publication. Dans ces cas, on peut proposer d'estimer l'écoulement annuel à partir des précipitations annuelles. La méthode est assez complexe et exige une application attentive, sous peine d'accumuler de nombreuses erreurs.

i) Evaluation des précipitations annuelles dans le bassin considéré

Pour les régions qui ne font pas l'objet de relevés, il faut appliquer par transposition ceux d'une station pluviométrique voisine. Pour cette opération, on tiendra compte des points suivants:

1. Comme les précipitations varient d'une région à l'autre, on se servira de préférence des relevés de la région la plus proche.
2. La station dont on utilise les relevés et le bassin considéré doivent se trouver dans la même zone climatique.
3. Il faut tenir compte des effets de l'altitude sur les précipitations et corriger celles-ci en conséquence.
4. On choisira une station dont les relevés portent sur une longue période (plus de 15 à 20 ans).

Si l'on ne dispose d'observations que pour une courte période (au moins plus de cinq ans), mieux vaut établir d'abord la corrélation entre ces observations et celles de la station voisine disposant de relevés pluviométriques sur une période plus longue, afin d'extrapoler sur 15 ou 20 ans (par une analyse de corrélation) puis de transposer la série chronologique ainsi obtenue au bassin considéré.

L'analyse de corrélation sert beaucoup dans les calculs hydrologiques. Elle permet d'interpoler et d'extrapoler, de contrôler et de corriger les données et d'en tirer des formules empiriques, etc.

ii) Evaluation de la série des écoulements annuels du bassin considéré

1. Choix de la station et du bassin témoins

Pour convertir les précipitations annuelles en écoulement annuel, il faut établir leur corrélation. Celle-ci n'est pas connue s'il n'existe pas de station hydrologique dans le bassin considéré. Dans ce cas, on l'évalue dans le bassin où se trouve une station hydrologique, puis on l'applique par transposition au bassin considéré. Cette station et le bassin de drainage où elle se trouve sont dits station et bassin témoins. Normalement, on leur préférera la prochaine station en aval dont le bassin versant jouxte le bassin considéré ou une station voisine.

2. Une station témoin étant choisie, on porte sur un graphique les points de corrélation entre précipitations annuelles et écoulement annuel du bassin témoins.

Si ce bassin compte plusieurs stations pluviométriques, on prend la valeur moyenne de leurs relevés.

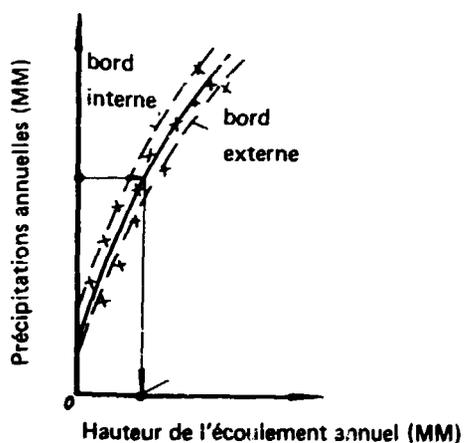
3. Analyse de la courbe de corrélation et transposition au bassin considéré

Pour choisir le bassin témoin, il est nécessaire de comparer et d'analyser les facteurs qui influent sur l'écoulement annuel des deux bassins respectifs. Avec un petit bassin, ces facteurs sont: sa hauteur moyenne; la direction relative de sa pente et des courants atmosphériques; la conservation des forêts, terres agricoles, sols et eaux; la pente moyenne; les conditions sylvicoles, pédologiques et géologiques; le volume de l'écoulement souterrain, etc.

Si les conditions sont analogues dans les deux bassins, on peut tracer une courbe régulière entre les points de corrélation et obtenir ainsi une bande donnant la série statistique des écoulements, comme le montre la figure 4-1.

4. Calcul de la série des écoulements annuels dans le bassin considéré

Figure 4-1
Courbe de corrélation entre précipitations et écoulement



Par la courbe de corrélation de la figure 4-1, on peut déterminer les écoulements annuels du bassin considéré d'après la série correspondante des précipitations et des écoulements annuels. Une série couvrant plus de 15 à 20 ans est souhaitable.

c) Evaluation de l'écoulement annuel de la centrale projetée à partir de celui de la station témoin (méthode d'analogie hydrologique)

S'il existe une station hydrologique proche où les conditions géologiques naturelles sont analogues, il est indiqué de la choisir pour station témoin. On se servira de ses données relevées sur une longue période ou extrapolées.

Si la différence entre les deux bassins n'est que de 3 à 5 pour cent, on peut se servir directement des données de la station témoin. Si la différence est de 10 à 15 pour cent, ces données peuvent se transposer d'après le quotient des superficies:

$$Q_a = \frac{F}{F_r} Q_{ar} \quad (\text{MCS}) \quad 12)$$

Si les précipitations se répartissent inégalement, on doit envisager de les corriger par la formule suivante:

$$Q_a = \frac{\chi_a}{\chi_{ar}} \cdot \frac{F}{F_r} \cdot Q_{ar} \quad (\text{MCS}) \quad 13)$$

- où Q_a et Q_{ar} désignent les volumes respectifs de l'écoulement à la centrale projetée et à la station témoin
- F et F_r désignent les surfaces de drainage respectives de la centrale projetée et de la station témoin (en km^2)
- χ_a et χ_{ar} désignent les précipitations annuelles respectives à la centrale projetée et à la station témoin (en MM).

2. Choix d'une année théorique

Pour les calculs qu'exigent les MCH, on choisit d'ordinaire trois années théoriques:

- L'année des basses eaux: l'écoulement correspondant sert à prévoir la production de la MCH les années sèches. Une probabilité de 75 à 80 pour cent lui est attribuée dans la série.
- L'année des moyennes eaux: d'ordinaire, une probabilité de 50 pour cent lui est attribuée dans la série.
- L'année des hautes eaux: elle fait pendant à l'année des basses eaux. Une probabilité de 20 à 25 pour cent lui est attribuée dans la série.

L'année choisie sert à deux fins: déterminer l'écoulement annuel cette année-là et sa répartition dans la même année.

a) Volume de l'écoulement annuel

Selon les méthodes susmentionnées, on trace d'abord la courbe de fréquence des écoulements annuels. Par cette courbe, on peut trouver le volume de l'écoulement de l'année choisie (d'une fréquence déterminée).

b) Régime de l'écoulement

Qu'il s'agisse de ruisseaux ou de rivières, l'écoulement varie pendant l'année. Sa répartition diffère non seulement de celle d'autres années où son volume était différent, mais aussi de celle où son volume était le même. Etant donné que de cette répartition au long de l'année dépend l'exploitation de la retenue et de la centrale, une bonne répartition s'impose.

En pratique, connaître cette répartition revient à tracer l'hydrogramme de l'écoulement annuel. Pour une centrale à régulation annuelle, la répartition ressort du débit mensuel moyen. Pour une centrale au fil de l'eau ou à régulation journalière, il y a lieu d'indiquer le débit quotidien de l'année théorique.

i) Hydrogramme d'une année type

La première méthode consiste à choisir une année type parmi les observations annuelles. Le volume de l'écoulement cette année-là doit être égal à celui de l'année théorique ou en approcher. On prend alors sa répartition au long de l'année type pour l'appliquer telle quelle à l'année théorique.

La seconde méthode consiste à choisir la répartition de l'écoulement pendant une année très différente de l'année type. Dans ce cas, une correction s'impose au moyen du quotient des écoulements annuels.

Le coefficient de correction K s'écrit donc:

$$K = \frac{\text{écoulement de l'année théorique}}{\text{écoulement de l'année type}} \quad 14)$$

Le débit de l'année type, multiplié par K, donne le débit de l'année théorique. On obtient ainsi la répartition de l'écoulement dans cette année-là.

ii) Tracé de l'hydrogramme d'une zone sans relevés

— Solution 1:

Au moyen des observations faites dans un bassin analogue voisin et par l'une des deux méthodes ci-dessus, on détermine la répartition de l'écoulement théorique dans l'année.

— Solution 2:

Avec l'annuaire hydrologique régional, on calcule le pourcentage de l'apport mensuel au volume de l'écoulement annuel d'une rivière analogue ou voisine (ce pourcentage se fonde sur de nombreuses données d'observation). On calcule alors l'écoulement mensuel à la centrale projetée.

— Solution 3:

En fonction de la répartition des précipitations lors d'une année présentant la fréquence voulue (précipitations reçues par le bassin versant de la centrale projetée), on simule l'hydrogramme donnant le débit de l'année théorique qui présente la même fréquence.

3. Détermination de l'étiage en l'absence de données hydrologiques

Faute de données hydrologiques sur le bassin versant en amont de la centrale projetée, on peut se servir de celles du bassin témoin, où la surface de drainage, les conditions hydrogéologiques, les terres et la végétation sont analogues à celles du bassin considéré. La transposition peut se faire directement ou, le cas échéant, par correction au moyen du quotient des superficies de drainage. Des enquêtes et mesures sur les lieux servent aussi à déterminer l'étiage théorique quotidien.

La probabilité correspondante, adoptée dans les calculs relatifs aux MCH, varie beaucoup (50 à 85 pour cent). Quand elle est faible (de l'ordre de 50 pour cent), on fait davantage de relevés. Si l'alimentation en énergie doit être particulièrement sûre ou si les ressources hydrauliques abondent, alors que les usagers sont peu nombreux, on suggère d'observer et d'étudier le débit quotidien moyen lors d'une saison sèche ordinaire et de le prendre pour débit disponible à la centrale.

Pour déterminer l'étiage, on tiendra compte du débit qui sera prélevé lors de l'aménagement ou de la construction d'un ouvrage hydraulique sur le cours ou les affluents amont de la rivière. Ce débit devra être déduit de l'étiage théorique.

Plusieurs moyens s'offrent pour observer et mesurer l'étiage:

- observer ou estimer la cote des basses eaux et calculer ensuite le débit d'étiage par la formule appropriée;
- mesurer à l'échelle limnimétrique;
- mesurer au déversoir;
- déterminer l'étiage au moyen d'une carte ou table des isohyètes des débits quotidiens.

Pour estimer l'écoulement annuel dans les régions qui manquent de données hydrologiques, divers moyens permettent la comparaison. L'estimation obtenue peut se vérifier de la façon suivante:

- vérifier la différence des débits en aval et en amont du cours principal (grands affluents compris);
- vérifier si le volume des précipitations dépasse celui de l'écoulement pendant la même période et vérifier le coefficient d'écoulement;
- vérifier si le coefficient de variation est plus grand pour l'écoulement que pour les précipitations pendant la même période;
- vérifier si la répartition régionale de la valeur moyenne et du coefficient de variation est la même qu'à la station voisine;
- vérifier l'égalité de répartition de l'écoulement dans chaque période de l'hydrogramme.

C) Crues

A la maîtrise centrale de la préfecture ou de l'arrondissement, à régulation annuelle, on doit veiller à assurer une protection contre les crues, si importante pour les vies et les biens des masses populaires comme pour le succès ou l'échec du projet. Si cette protection s'impose en aval, le réservoir doit pouvoir retenir la crue pour l'écrêter. Il est nécessaire, en cas de crue d'une fréquence déterminée, de pouvoir réduire le débit aval au-dessous du débit permissible. Cette fréquence sert de norme type pour la protection contre les crues. En général, elle se situe entre 2 et 20 pour cent pour l'agriculture et entre 0,2 et 10 pour cent pour les districts industriels et zones urbaines.

Dans un projet de protection des eaux, quand se produit une crue de fréquence déterminée, on doit empêcher qu'elle détruise les principaux ouvrages hydrauliques (barrage, usine). Pour les MCH, le but principal de la protection contre les crues est d'assurer la sécurité des ouvrages.

Les tableaux 4-3 et 4-4, au début du chapitre, indiquent les fréquences servant de critère pour les moyens et petits.

1. Débit théorique maximal de la crue

a) Calcul du débit théorique maximal à partir des données d'observation

Si des stations hydrologiques sont installées en amont ou en aval près de la centrale projetée, on dispose d'ordinaire d'une longue série (plus de 20 ans) d'observations sur les crues; à partir de ces données, on peut procéder à une analyse de fréquence. L'étude des données sur les crues historiques est utile aussi pour déterminer le débit théorique correspondant. Le calcul s'opère comme suit:

- i) calculer et porter sur un graphique la fréquence empirique des débits annuels maximaux;
- ii) déterminer la moyenne Q_{fav} des valeurs maximales, son coefficient de variation C_vf et ses autres paramètres statistiques;
- iii) appliquer au petit bassin versant un coefficient d'asymétrie C_{sf} . D'ordinaire, C_{sf} égale 2, 3 ou 4 C_vf ;
- iv) analyser et vérifier les données sur la crue historique et estimer sa fréquence;
- v) par lissage, ajuster aussi bien que possible les points de la courbe de fréquence théorique aux points de la courbe de fréquence empirique (on peut aussi tenir compte de l'influence de la crue historique) et, éventuellement, calculer le C_{sf} en fonction du C_vf . Pour ajuster les courbes, on tiendra surtout compte de la partie supérieure;
- vi) de la courbe de fréquence des crues on peut tirer le débit maximal correspondant à une fréquence différente.

b) Calcul du débit théorique maximal par d'autres méthodes

Les MCH sont d'ordinaire installées dans des régions où les relevés font défaut. En pareil cas, il est recommandé, pour déterminer la crue théorique, d'appliquer la méthode synthétique fondée sur le débit, volume et module des crues dans le bassin de la station voisine et sur la carte des isohyètes des orages, ainsi que le calcul, par la méthode régionale synthétique, des paramètres de l'écoulement dû aux orages. L'autre façon consiste à se servir de formules empiriques régionales.

Si l'on dispose de données sûres au sujet des crues historiques et si leurs probabilités répondent aux conditions des normes techniques, ces crues peuvent servir directement ou après correction appropriée à déterminer la crue théorique. On trouvera exposés ci-après plusieurs modes de calcul.

- i) Estimation du débit théorique maximal à partir de l'orage théorique par la méthode rationnelle

Quand le bassin drainé par la rivière est inférieur à 500 km^2 dans une région montagneuse ou semi-montagneuse, la formule de base servant à estimer le débit théorique maximal à partir de l'intensité des orages est la suivante:

$$Q_f = 0,278 \phi \text{ ip F} = 0,278 \phi \frac{S}{\tau n} F \quad (\text{MCS}) \quad 15)$$

où	0,278	est le coefficient de conversion d'unité
	i_p	désigne l'intensité de l'orage théorique (mm/hr)
	φ	désigne le coefficient d'écoulement maximal, c'est-à-dire le quotient volumétrique de l'orage par l'écoulement au plus fort de la crue
	S	désigne l'intensité de l'averse, c'est-à-dire la précipitation horaire maximale (mm/hr)
	τ	désigne le temps de concentration de la crue (en heures). Dans un petit bassin, on peut admettre que le temps de concentration du débit maximal est égal à la durée de l'orage
	n	désigne le coefficient de régression de l'orage
	F	désigne la superficie du bassin (km^2).

Les principaux paramètres et coefficients de la méthode rationnelle se déterminent comme suit:

i) Paramètres du bassin:

F	désigne la superficie de drainage de la section commandée par la centrale projetée
L	désigne la distance mesurée en suivant le lit de la rivière entre le point le plus éloigné du bassin versant et la centrale projetée (km)
J	désigne la pente moyenne du lit.

Ces trois paramètres peuvent se mesurer sur la carte topographique au 1/50 000.

2. Le paramètre S (densité de l'orage) peut se calculer par la formule suivante:

$$S = \frac{H_{24p}}{24^{1-n}} = \frac{K_p \bar{H}_{24}}{24^{1-n}} \quad (\text{MM/hr}) \quad 16)$$

où	H_{24p}	désigne le volume d'un orage de 24 heures maximum d'une fréquence donnée (MM)
	H_{24}	désigne la moyenne annuelle des volumes maximaux d'orages de 24 heures (MM) (s'obtient d'ordinaire à partir des cartes des isohyètes donnant les paramètres des orages)
	K_p	se trouve dans la table correspondante (en fonction des données locales ou en prenant $Cs_{24} = 3,5 C_v_{24}$) pour la fréquence p et les coefficients Cf et Cs de l'orage de 24 heures maximum
	n	désigne le coefficient de régression de l'orage (qui varie avec la durée de l'averse). Si l'averse dure moins d'une heure, $n = n_1$; si elle dure une heure ou plus, $n = n_2$ (l'annuaire hydrologique donne la valeur de n).

3. Le temps de concentration τ (en heures) est le temps de concentration de la crue dans le bassin versant. Il dépend de la longueur de la rivière, de la pente de son lit et de la vitesse de concentration. Il varie aussi avec la taille de la crue. Pour son calcul, on dispose de formules et de nomogrammes empiriques adaptables aux conditions locales de chaque région.

4. Le coefficient d'écoulement maximal (φ) dépend des conditions topographiques, de la conservation des eaux et des sols, de la fréquence des crues et de ses facteurs antécédents. Si ces facteurs sont analogues, φ prendra une valeur d'autant plus forte que la zone de drainage est moins étendue.

ii) Formule empirique

A partir des données d'observation appliquées à l'étude de la crue et compte tenu de la géographie, on peut établir dans les diverses régions la formule empirique permettant de déterminer le débit maximal de la crue. Une de ces formules s'écrit:

$$Q_{fp} = C_p F^K \quad (\text{MCS}) \quad 17)$$

- où Q_{fp} désigne le débit maximal d'une certaine fréquence (MCS)
 F désigne la surface de drainage (en km^2)
 C_p désigne le module du débit maximal. Son paramètre empirique relatif à la fréquence figure dans l'annuaire hydrologique régional. D'ordinaire, dans un bassin à forte pente qui s'élargit en éventail, C_p augmente de valeur; dans un bassin étroit et relativement plat, il diminue
 K désigne le coefficient de superficie, coefficient empirique qui se rapporte aux facteurs géographiques naturels de la région (figure aussi dans l'annuaire hydrologique).

Une autre formule empirique s'écrit:

$$Q_{fp} = qSF^{\frac{2}{3}} \quad (\text{MCS}) \quad 18)$$

- où S Désigne la densité de l'averse (MM/hr) (à prendre dans l'annuaire hydrologique de la région ou à calculer selon la formule (16))
 q désigne le paramètre de débit maximal, que donne le tableau 4-5.

Tableau 4-5
Paramètre de débit maximal q

Bassin de concentration de la crue \ Paramètres	Pente du lit J (%)	Coefficient d'écoulement ϕ	Vitesse de concentration v (m/sec)	Paramètre de débit maximal q
Région de montagnes rocheuses	> 15	0,80	2,2 - 2,0	0,60 - 0,55
Région de collines	> 5	0,75	2,0 - 1,5	0,50 - 0,40
Région de collines de loess	> 5	0,70	2,0 - 1,5	0,47 - 0,37
Plaine à faible pente	> 1	0,65	1,5 - 1,0	0,40 - 0,30

où q se calcule par la formule $q = 0,42 \phi v 0,7$

iii) Etude et calcul de la crue historique

La crue historique date de très longtemps et, pour cette raison, n'a pas été mesurée. Il faut donc, grâce à son étude, établir une série extrapolée pour faire ensuite un calcul valable. Telle est la démarche suivie d'ordinaire, surtout dans les régions où n'existent pas de relevés.

L'essentiel, dans l'étude de la crue historique, est d'en découvrir des traces certaines. Grâce à elles, on peut calculer son débit. En général, d'après les levés de la coupe en long et en travers du lit et de l'étendue de la crue, on peut calculer les facteurs hydrauliques correspondants. La formule hydraulique donne alors le débit maximal correspondant à la hauteur de la crue étudiée.

2. Volume de la crue théorique

Pour les moyens et petits projets, on se sert généralement du volume d'une crue d'orage d'un jour ou, parfois, de trois jours. Pour les rivières qui font l'objet de relevés, on dispose, par des analyses et calculs fréquents, de longues observations sur des crues de un à trois jours: le volume théorique peut donc se déterminer selon la fréquence correspondante.

Dans les petites et moyennes zones de drainage où l'on manque de données, on considère d'ordinaire le volume d'une seule crue. Deux méthodes existent pour son estimation:

- i) Par le volume approximatif accumulé après un orage durant 24 heures au maximum.

$$W_{df} = 1.000 \ h_{24d} \ F \ m^3 \ \dots\dots \quad 19)$$

où W_{df} désigne le volume de la crue théorique (m^3)
 h_{24d} désigne l'excédent (en MM) d'une pluie de 24 heures maximum correspondant à la fréquence de la crue théorique.

Ce coefficient h_{24d} se calcule comme suit:

- tirer de l'annuaire hydrologique, pour l'année moyenne, le volume d'eau \bar{H}_{24} tombée pendant un orage de 24 heures maximum ainsi que son coefficient de variation Cv_{24} ;
- trouver dans le même annuaire le facteur modulaire K_{pd} de l'orage théorique correspondant à la fréquence de la crue théorique et au coefficient Cv_{24} ;
- calculer le volume H_{24d} d'eau tombée pendant un orage théorique de 24 heures, par la formule $H_{24d} = K_{pd} \bar{H}_{24}$; 20)
- d'après H_{24d} et par la courbe $H_{24}-h_{24}$ de l'annuaire hydrologique, trouver l'excédent h_{24d} d'une pluie de 24 heures maximum.

- ii) Par le volume d'eau tombée pendant un orage théorique de 24 heures et le coefficient d'écoulement correspondant selon la formule:

$$Wdf = 1.000 \text{ H24d} \cdot \phi \cdot \alpha_{24} \cdot F \text{ (m}^3\text{)} \quad 21)$$

où	H24d	désigne le volume (MM) d'eau tombée pendant un orage théorique de 24 heures et figure dans l'annuaire hydrologique
	ϕ	désigne le facteur de la superficie de drainage et figure dans l'annuaire hydrologique. Sa valeur augmente pour un petit bassin: s'il couvre moins de 300 km ² , elle approche de 1
	α_{24}	désigne le coefficient d'écoulement d'un orage de 24 heures et se trouve aussi dans l'annuaire.

3. Hydrogramme théorique

Deux méthodes servent à tracer l'hydrogramme de progression de la crue.

i) Extension de l'hydrogramme type

Si l'on dispose de la série des crues annuelles, on peut tracer l'hydrogramme théorique par extension de l'hydrogramme type.

Il est bon de choisir l'hydrogramme des années de hautes eaux où les données sont particulièrement représentatives et relativement fiables et où les crues menacent la sécurité des ouvrages.

Le débit de la crue théorique s'obtient en multipliant le débit de la crue typique par un coefficient d'extension $K_f > 1$ selon la formule

$$K_f = \frac{Q_{df}}{Q_{tf}} \quad 22)$$

où Q_{df} désigne la crue théorique maximale (MCS)
 Q_{tf} désigne la crue typique maximale (MCS)

ii) Simplification de l'hydrogramme de la crue théorique

L'établissement de l'hydrogramme de la crue théorique dans le bassin sans relevés se rattache à la méthode de calcul du débit maximal. On peut le tirer directement de l'hydrogramme unitaire et des isochrones. Si le débit maximal se calcule par des formules rationnelles et des formules empiriques régionales, on n'obtient pas d'hydrogramme. Il convient donc d'utiliser un hydrogramme simplifié.

Les affluents de montagne ont de petits bassins, dont la pente est forte de même que celle de leur lit, et leurs régimes varient beaucoup. Pour les petits ouvrages, l'hydrogramme de la crue théorique peut donc prendre la forme simplifiée d'un triangle, comme le montre la figure 4-2. De préférence, cet hydrogramme simplifié sera choisi en fonction de ceux des régions voisines.

Dans cet hydrogramme simplifié, la relation entre le volume et le débit maximal s'écrit:

$$\bar{W}_{df} = \frac{1}{2} Q_{df} \cdot T \quad 23)$$
$$T = \frac{2\bar{W}_{df}}{Q_{df}}$$

où \bar{W}_{df} désigne le volume de la crue théorique
 Q_{df} désigne le débit maximal de cette même crue.

Par une analyse synthétique, des données d'observation et d'étude, on obtient, pour application, la relation empirique entre le temps de montée de la crue T_i , sa durée T et des bassins d'étendue variable.

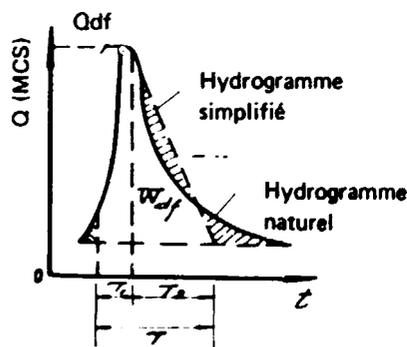
A titre d'exemple, le tableau 4-6 montre la relation existant entre le quotient $\frac{T_i}{T}$ et la superficie des bassins dans un district de la Chine. Il provient de l'analyse et de la synthèse de T_i et de T dans de nombreux hydrogrammes.

Tableau 4-6
Tableau donnant la valeur de $\frac{T_i}{T}$ en fonction de F

F (km ²)	1 - 3	4 - 10	11 - 20	21 - 40	41 - 100	101 - 200	201 - 500	501 - 1.000
$\frac{T_i}{T}$	0,374	0,352	0,337	0,325	0,312	0,300	0,289	0,277

Par la formule (23), on peut obtenir T si on connaît le débit maximal et le volume de la crue théorique. A partir de la relation existant entre $\frac{T_i}{T}$ et F dans le bassin considéré ou dans un bassin analogue ou voisin, on peut aussi obtenir T_i . Ensuite, on trace l'hydrogramme simplifié sous forme de triangle.

Figure 4-2
Hydrogramme de crue simplifié sous forme de triangle



D) Etablissement de la relation entre cote et débit

1. Pour le bassin sans relevés, la relation entre cote et débit peut se déduire de résultats du calcul hydraulique appliqué aux données d'étude. Le degré d'approximation sera fixé avec prudence.

On devra tenir compte par avance de l'adaptation au lit de la rivière et des différences dans les conditions de contrôle.

2. Si on connaît les cotes du courant mais non les débits, il est possible de prendre la relation entre cote et débit (établie à partir de données d'observation) pour le cours amont ou aval et de la transposer à la centrale projetée en déterminant la corrélation entre les cotes d'amont et d'aval. Une extrapolation par des méthodes appropriées s'impose si la valeur théorique sort du cadre des données d'observation.

3. On tiendra compte, le cas échéant, de l'influence de la retenue.

IV. ENERGIE HYDRAULIQUE

L'énergie hydraulique théorique sert à définir la puissance de la centrale projetée. Ses caractéristiques sont la régularisation du courant, l'énergie disponible, la puissance installée, la production annuelle moyenne, etc. Elles indiquent l'apport énergétique de la centrale et le degré d'utilisation de l'eau dans la mise en valeur de ce torrent ou de cette rivière. Le présent paragraphe traite en détail du choix de la puissance installée d'une MCH à régulation journalière établie au fil de l'eau.

Les données techniques réunies pour calculer l'énergie hydraulique théorique sont les suivantes:

- Données hydrologiques:
caractéristiques du bassin de drainage; relevés hydrologiques à l'endroit de la centrale; courbe donnant la relation entre cote et débit au même endroit; et données mensuelles sur les précipitations et l'évaporation.
- Courbe de superficie et courbe de capacité du réservoir.
- Besoins d'utilisation polyvalente:
irrigation, adduction d'eau, navigation et flottage.
- Conditions de charge:
comprennent le rayon de desserte pour la centrale projetée et les caractéristiques de la charge du réseau régional.

Pour les MCH rurales, on peut simplifier les données requises ainsi que les calculs.

A) Charge électrique

Dans les campagnes chinoises, les principaux usages de l'électricité sont l'irrigation et le drainage, la transformation des produits d'origine agricole, le travail à la ferme, la réparation des machines agricoles, la fabrication des engrais et insecticides, l'élevage, les industries du papier, du sucre, des tuiles, etc. Le tableau 4-7 donne leur consommation moyenne.

Tableau 4-7
Normes de consommation d'énergie

Utilisation	Consommation	Utilisation	Consommation
Battage	6 - 12 KW-hr/tonne	Briqueteries et tuileries	50 KW-h/1.000 yuan
Mouture	40 KW-hr/tonne	Insecticides	80 KW-h/tonne
Décortiquage	30 KW-hr/tonne	Raffinerie de sucre	12 KW-h/tonne
Production d'huile de table	60 ~ 90 KW-hr/tonne	Machines agricoles	40 - 80 KW-h/1.000 yuan
Mines	8 KW-hr/tonne	Engrais	30 KW-h/tonne
Fabrication du papier	500 ~ 600 KW-hr/tonne	Pompage électrique	H = 20 ^M KW-h/M ³
Eclairage	15 ~ 25 Watt/ménage	Pompage électrique	H = 40 ^M KW-h/M ³

D'abord, il importe de calculer la consommation requise dans un avenir rapproché et éloigné pour déterminer la taille de la centrale. Si elle est suréquipée et que la demande d'électricité soit faible, on aura gaspillé des investissements. D'autre part, si elle est sous-équipée (la hauteur de chute et le débit étant utilisés à plein) et que la demande soit forte, il faudra l'agrandir ou en construire une nouvelle. Pour les centrales au fil de l'eau exploitées de façon indépendante, on ne calcule que la charge maximale d'après les besoins en alimentation électrique. Il faut réunir les données suivantes:

- rayon de desserte, portée, genre de production, nombre d'équipes, période de charge, capacité des installations et taux de leur utilisation;
- consommation annuelle et mensuelle d'énergie et, pour chaque mois, jours de travail des divers usagers;
- population actuelle et future des villes situées dans le rayon de desserte avec leur consommation d'énergie, y compris celle des activités secondaires fondées sur l'agriculture (quantifiées).

Le rayon de desserte d'une centrale hydro-électrique dépend de la charge du réseau régional et de ses possibilités de développement. Le tableau 4-8 donne la relation entre ce rayon, la tension et la puissance transportable.

Tableau 4-8
Puissance et distance de transport pour différentes tensions

Tension de la ligne (kV)	Puissance transportable (kW)	Distance de transport (km)
0,22	< 50	0,15 <
0,38	< 100	0,6 <
10	200 - 2.000	6 - 20
35	1.000 - 10.000	20 - 70

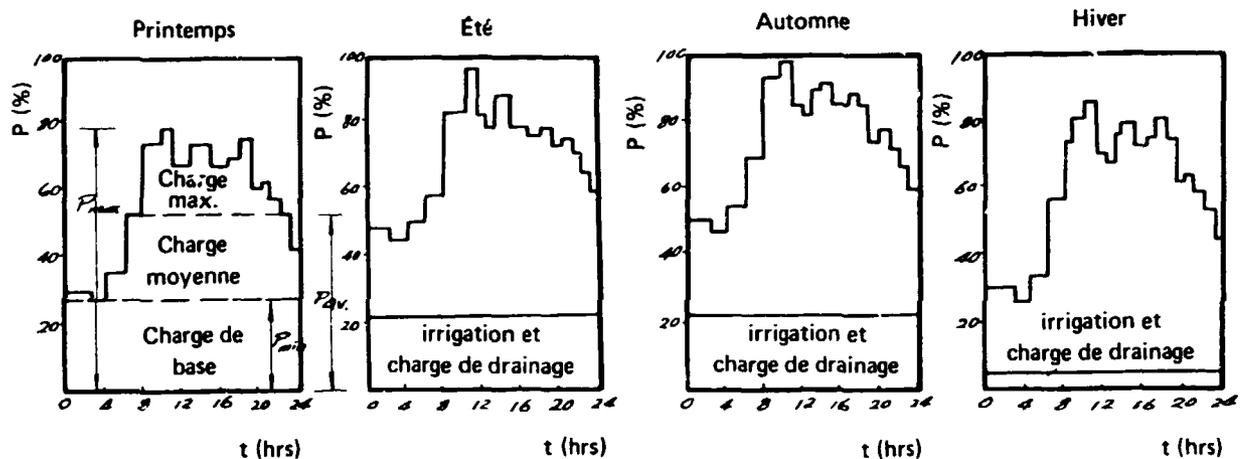
Parmi toutes les charges, la consommation annuelle de l'industrie est assez égale, mais la charge journalière varie beaucoup avec le roulement des différentes équipes et le genre de production. Actuellement, en Chine, les pompage et drainage électriques constituent l'utilisation principale dans les campagnes. L'électricité fournie à l'agriculture présente un caractère saisonnier. La charge doit être brusquement augmentée pour le pompage et le drainage, et l'irrigation exige une alimentation diurne et nocturne suivie. La consommation des activités subsidiaires dans les campagnes se produit surtout en hiver.

L'éclairage des villes et des campagnes varie au cours de la journée de 24 heures et aussi pendant l'année.

1. Charge journalière

La somme des consommations de l'industrie, de l'agriculture et de l'éclairage donne la charge journalière typique.

Figure 4-3
Diagramme type de la charge journalière



Le diagramme de la charge quotidienne présente trois valeurs caractéristiques (P_{max} , P_m et P_{min}). P_{max} désigne la charge maximale au cours de la journée. Pour la supporter, la puissance totale installée de la centrale doit lui être supérieure. P_m désigne la charge moyenne au cours de la journée: l'alimentation journalière en énergie est donc égale à $24 P_m$. P_{min} désigne la charge de base. Avec ces trois valeurs caractéristiques, on peut diviser le diagramme verticalement en trois parties. La charge de pointe (celle qui varie le plus) se situe au-dessus de la charge moyenne, qui est donc entre les deux.

2. Diagramme de charge annuelle

Ce diagramme sert à indiquer les variations en cours d'année: on y porte d'ordinaire la charge en ordonnée et le temps (exprimé en mois ou en jours) en abscisse.

Si le réseau considéré sert largement à l'agriculture, activité à caractère fortement saisonnier, la charge de pointe ne se produira pas pendant la saison sèche. Par exemple, si une centrale est destinée surtout à fournir de l'électricité pour pompage et drainage, cette activité sera nulle en saison sèche. Donc, s'il n'importe guère de déterminer la probabilité de tel ou tel débit en saison sèche, il est indispensable d'étudier les caractères hydrologiques de la saison de drainage, en même temps que la puissance absorbée par le pompage pour déterminer l'énergie disponible et la puissance utile maximale de la centrale.

D'ordinaire, on établit deux diagrammes typiques de la charge quotidienne, l'un pour l'hiver et l'autre pour l'été, de l'année pour laquelle on a établi la charge théorique. Pour les MCH rurales, ce n'est pas nécessaire: on ne tient compte que des caractéristiques de la charge.

B) Centrale au fil de l'eau

1. Détermination de l'énergie disponible

Si on dispose de données hydrologiques, on pointe d'abord sur un graphique la courbe de fréquence du débit quotidien moyen. D'après la probabilité théorique correspondant à la centrale, on détermine le débit disponible Q_G selon cette courbe.

Si on ne dispose pas de données hydrologiques, on détermine le débit disponible correspondant à la probabilité théorique par la méthode décrite plus haut dans la partie III du présent chapitre.

La puissance disponible s'écrit:

$$N_G = A Q_G H \quad (\text{kW}) \quad 24)$$

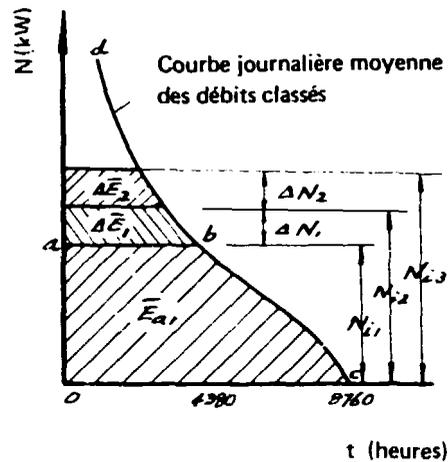
où N_G désigne la puissance disponible

Q_G désigne le débit disponible.

2. Energie produite au cours d'une année moyenne

Etant donnée que l'énergie produite varie avec l'année hydrologique, on prend une année moyenne pour indice du rendement énergétique d'une centrale.

Figure 4-4
 Courbe journalière moyenne des débits classés



La figure 4-4 montre la courbe de fréquence de la production quotidienne au cours de l'année moyenne: N_{i1} désigne la puissance installée. N_{i1} et la courbe de fréquence se coupent au point b. Le segment b d sur la courbe montre que l'énergie hydraulique est supérieure à N_{i1} . La production de la centrale ne saurait toutefois dépasser N_{i1} . Si le segment b c de la courbe indique que l'énergie hydraulique est moindre que N_{i1} , la production de la centrale variera selon b c. L'aire Oabc représente le régime d'exploitation en cours d'année ou, en d'autres termes, la production d'énergie d'une année moyenne (\bar{E}_a sur la figure). Il est évident que cette production dépend de la puissance installée. Si celle-ci est portée de N_{i1} à N_{i2} ($N_{i2} = N_{i1} + \Delta N$), la production annuelle passe de \bar{E}_a à $E_a + \Delta \bar{E}$. Normalement, l'accroissement $\Delta \bar{E}$ sera insensible si la puissance installée est trop forte, c'est-à-dire si $\Delta N_1 = \Delta N_2$, $\Delta \bar{E}_2 < \Delta \bar{E}_1$. Plusieurs variantes sont envisagées avec diverses puissances installées pour calculer la production correspondante de l'année moyenne et tracer ensuite la courbe $N_{i1} - \bar{E}_a$. La puissance installée étant choisie, cette courbe donne la production théorique pour l'année moyenne.

3. Détermination de la puissance installée

Pour une centrale au fil de l'eau, la puissance comprend:

- a) La puissance utile maximale: elle est installée pour satisfaire la demande maximale. D'ordinaire, elle ne dépasse pas l'énergie disponible.

$$N_W = N_G \quad (\text{kW}) \quad 25)$$

où N_W désigne la puissance utile maximale
 N_G désigne l'énergie disponible.

- b) La puissance de réserve: elle est nulle dans une centrale au fil de l'eau. Celle-ci ne peut apporter au réseau aucune puissance de secours ou de réserve.

La réparation des installations d'une telle centrale peut se faire pendant la saison sèche ou en période de faible charge. Si la puissance saisonnière est nulle en saison sèche, la puissance de réserve peut servir pour les travaux d'inspection. Si la centrale sert surtout à l'irrigation, les réparations peuvent être prévues pendant la période où l'on n'irrigue pas. Si les difficultés persistent, il faut envisager, pour les réparations, d'augmenter la puissance de réserve.

- c) La puissance saisonnière: la puissance utile maximale d'une centrale au fil de l'eau dépend du débit disponible. Pour utiliser pleinement l'énergie hydraulique en période de hautes eaux, on peut installer une puissance saisonnière quand les conditions suivantes sont remplies:
- Le réseau dispose d'une centrale thermique, de sorte que l'énergie hydro-électrique produite en période de hautes eaux économise le combustible de cette centrale.
 - La desserte comprend des consommateurs saisonniers: activités saisonnières de transformation outre le pompage électrique. S'il y a de gros consommateurs tels que les fours électriques pour le fer, l'aluminium et les engrais, le carbure de calcium, etc., on peut tirer pleinement parti de l'énergie saisonnière.
 - La centrale est rattachée au grand réseau, qui peut ainsi bénéficier de son énergie saisonnière.
 - Le réseau dispose d'un réservoir à régulation annuelle: pendant que la centrale au fil de l'eau fournit de l'énergie saisonnière, la centrale disposant d'un réservoir à régulation annuelle retient les eaux. Ainsi, celles-ci et l'énergie fournie se compensent.

Trois méthodes permettent de déterminer la puissance saisonnière:

i) Temps annuel d'exploitation de la puissance saisonnière

Pour utiliser l'énergie saisonnière, il faut installer une puissance correspondante. Les dépenses d'équipement, frais généraux, etc., s'en trouvent accrus. Le taux d'accroissement de l'énergie saisonnière sera réduit si la puissance installée est déjà élevée. En général le paramètre Δh_c sert à vérifier la viabilité du surcroît saisonnier de puissance selon la formule

$$\Delta h_c = \frac{\Delta E}{\Delta N} \geq h_s \quad (\text{heures}) \quad 26)$$

- où
- ΔN désigne le surcroît de puissance en fonction d'une certaine puissance installée (kW)
 - ΔE désigne le surcroît de production annuelle d'énergie correspondant à ΔN
 - Δh_c désigne le temps annuel d'exploitation (en heures) de la puissance additionnelle, fonction de la courbe de fréquence (courbe des débits classés) des apports hydrauliques journaliers (en heures)
 - Δh_s désigne la durée annuelle d'exploitation de la puissance additionnelle, fixée par le service compétent.

ii) Amortissement de l'investissement supplémentaire

On examine la viabilité du surcroît saisonnier de puissance d'après la recette annuelle provenant de l'énergie ainsi fournie. Un amortissement en trois à cinq ans est jugé normal.

iii) Temps annuel d'exploitation de l'énergie saisonnière

Il est donné par la formule suivante

$$h_c = \frac{\bar{E}_s}{N_s} \geq h_s \quad (\text{heures}) \quad 27)$$

- où \bar{E}_s désigne l'énergie saisonnière
 N_s désigne la puissance saisonnière installée
 h_c désigne le temps annuel d'exploitation (calculé en heures) de la puissance saisonnière
 h_s désigne le temps d'exploitation de la puissance saisonnière (spécifié en heures) qui est fonction des conditions énergétiques et économiques propres à la région et en particulier des consommateurs d'énergie saisonnière. Dans certaines régions de Chine, on recommande une durée de 1 800 à 2 500 heures (soit de deux mois et demi à trois mois).

Pour les minicentrales rurales, de même que pour les grandes qui manquent de données économiques et électriques, les méthodes simplifiées suivantes permettent de choisir la puissance installée.

a) Par un multiple de l'énergie disponible

On calcule d'abord l'énergie disponible, puis on analyse la composition du réseau, les caractéristiques de la charge, les ressources en eau et l'utilisation polyvalente pour déterminer la puissance installée, multiple de l'énergie disponible, par la formule

$$N_i = C N_G \quad 28)$$

- où C désigne le quotient de N_i par N_G
 N_i désigne la puissance installée
 N_G désigne l'énergie disponible

Le tableau 4-9 donne les valeurs empiriques de C dans plusieurs régions.

Tableau 4-9

**Tableau des valeurs de C
(quotient de la puissance installée par l'énergie disponible)**

Caractère de la centrale		C	
MCH rurale (moins de 500 KW) fonctionnant de façon indépendante		1,5 - 3,5	
Réseau alimenté en grande partie par de l'énergie hydro-électrique; et centrale disposant d'un réservoir régulateur	Uniquement production d'énergie	2,0 - 3,5	
	Surtout production d'énergie et, accessoirement, irrigation	2,5 - 4,0	
	Surtout irrigation	Installations ordinaires	3,0 - 5,0
		Bonnes installations	2,5 - 4,0
Réseau alimenté en faible partie par de l'énergie hydro-électrique	Uniquement production d'énergie	2,5 - 4,5	
	Surtout production d'énergie et, accessoirement, irrigation	3,0 - 4,5	
	Surtout irrigation	Installations ordinaires	3,5 - 5,5
		Bonnes installations	3,0 - 4,5

b) Par le temps annuel d'utilisation (en heures)

L'énergie d'une année moyenne E_a divisée par la puissance installée totale N_i de la centrale donne le temps annuel d'utilisation (en heures) h_p de cette centrale, selon la formule

$$h_a = \frac{E_a}{N_i} \quad 29)$$

Ce temps h_a équivaut au temps annuel d'exploitation à pleine charge et indique le degré d'utilisation de l'installation mécanique et électrique.

Le tableau 4-10 donne les valeurs empiriques du temps théorique d'utilisation annuelle dans certaines régions.

Tableau 4-10
Temps théorique d'utilisation annuelle de la puissance installée
(en heures)

Caractère de la centrale		Temps théorique (en heures) h_a		
		Type de régulation:		
		Centrale au fil de l'eau	Centrale à emmagasinage journalier	Centrale à emmagasinage annuel
MCH rurale (moins de 500 KW)	Production agricole et secondaire, éclairage	> 4.500	> 3.500	
	Petite industrie et éclairage urbain	> 4.500	> 3.500	
Surtout pompage et, accessoirement, autres utilisations		5.000 ±	4.500 ±	2.500 - 4.000
Réseau alimenté en grande partie par de l'énergie hydro-électrique	Assez gros consommateurs industriels à production continue	5.000 - 6.000	5.000 - 6.000	4.000 - 5.000
	Consommateurs ordinaires	5.000 - 6.000	4.000 - 5.000	3.500 - 4.000
Réseau alimenté en faible partie par de l'énergie hydro-électrique		4.500 - 5.500	3.500 - 4.500	3.000 - 4.000

On doit mentionner que les méthodes a et b ci-dessus s'adaptent à certaines conditions. Leur adoption dépendra de la situation de fait. Pour se servir des tableaux 4-9 et 4-10, on tiendra compte des considérations suivantes:

- Dans les régions riches en eau, on choisira une valeur élevée pour le temps théorique d'utilisation annuelle h_a et une faible valeur pour le quotient C de la puissance installée par l'énergie disponible, à la différence des régions pauvres en eau.
- Dans la zone de climat continental où le régime des cours d'eau varie en cours d'année, on prendra une valeur forte pour C et une faible pour h_a .
- Si le réseau compte déjà plusieurs centrales (avec une retenue régulatrice de grande capacité), la nouvelle centrale fournira une charge assez uniforme. On recommande donc une valeur forte pour h_a et faible pour C et l'inverse dans le cas contraire.
- Dans un réseau où la charge quotidienne varie fortement, si la charge de base et une partie de la charge moyenne sont assurées par la centrale thermique et la centrale hydro-électrique au fil de l'eau, on recommande une valeur faible pour h_a et forte pour C; et l'inverse dans le cas contraire.
- Dans les centrales alimentées par de l'eau d'irrigation (avec réservoir régulateur), l'énergie disponible sera assez basse et l'énergie saisonnière assez forte. On prendra donc une valeur élevée pour C.
- Les valeurs de h_a et de C pour une centrale dépourvue de régulation dépendent du degré d'utilisation de son énergie saisonnière.
- Si la centrale dispose d'une puissance de réserve, on recommande une valeur faible pour h_a et forte pour C.

c) Par rapport au groupe turbo-générateur type

Quelque méthode qu'on adopte pour déterminer la puissance installée, il faut tenir compte de la fabrication et de la livraison du matériel mécanique et électrique. En certains cas, l'installation de la centrale dépend surtout des groupes disponibles. Si on choisit un groupe turbo-générateur type, il est aisé de se le procurer.

Quant au nombre de ces groupes, il sera de préférence de deux si la puissance installée est inférieure à 1 000 kW; et de deux ou trois si elle se situe entre 1 000 et 3 000. Dans la plupart des MCH, il est inférieur à quatre.

La puissance de chaque groupe égale ou approche l'énergie disponible. A défaut de groupe idoine, la puissance de chacun doit être au moins 1,6 fois l'énergie disponible.

Au total, on dispose de trois méthodes simplifiées pour déterminer la puissance installée. La première part de l'énergie disponible. La puissance utile maximale étant calculée, on choisit la puissance installée par analyse, en prenant un multiple de l'énergie disponible. La seconde méthode part du temps d'utilisation annuelle, qui dépend des ressources énergétiques de la région, des caractéristiques de la charge et de la capacité régulatrice de la centrale. La troisième méthode de calcul se fait par rapport au groupe turbo-générateur type. Dans les études techniques des MCH rurales (puissance installée inférieure à 500 kW), on choisit une énergie hydraulique théorique aussi simple que possible pour éviter des calculs complexes.

C) Centrale à régulation journalière

Cette centrale dispose d'un réservoir qui permet de régulariser le débit pendant la journée. Le calcul de l'énergie disponible et de l'énergie produite pendant une année moyenne s'opère essentiellement comme pour une centrale au fil de l'eau. La seule différence est qu'en amont de la centrale au fil de l'eau, le niveau maximum normal reste constant, alors qu'en amont de la centrale régulatrice, le niveau varie entre le maximum normal et le minimum. On prend le niveau moyen pour calculer l'énergie.

Quant à la puissance installée des MCH à régulation journalière, du fait de leur capacité de répartir le débit dans la journée, leur production d'énergie en 24 heures est égale à l'énergie provenant du débit entrant le même jour. Donc, la charge maximale peut dépasser la production moyenne journalière, et la puissance utile maximale qui est installée (pour satisfaire la demande maximale) peut dépasser l'énergie disponible fournie par le débit naturel.

Les deux cas suivants serviront l'exemple.

1. Production d'énergie concentrée pendant quelques heures:

Le schéma 4-5 figure une centrale à régulation journalière. Toute sa production est concentrée en h heures. Dans ce cas, tout le débit entrant théorique est concentré de même. Le débit maximal est alors de

$$Q_{\max} = \frac{Q_G \times 24 \times 3600}{h \times 3600} = \frac{24}{h} \cdot Q_G \quad (30)$$

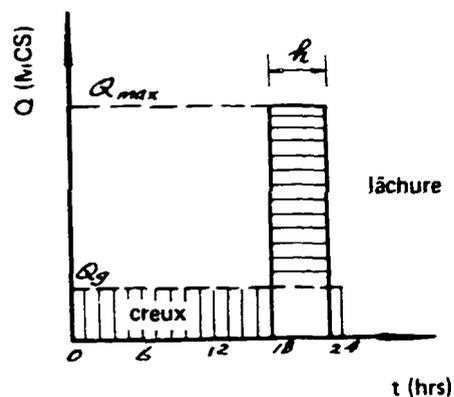
Donc, la puissance utile maximale est de

$$\begin{aligned} N_W &= A Q_{\max} H = A \cdot \frac{24}{h} Q_G H \\ &= \frac{24}{h} N_G \quad (\text{kW}) \end{aligned} \quad (31)$$

où N_W désigne la puissance utile
 N_G désigne l'énergie disponible des apports.

Manifestement, avec le même pourcentage théorique de probabilité, la puissance utile maximale d'une telle centrale est égale à $\frac{24}{h}$ fois celle d'une centrale sans pareille régulation.

Figure 4-5
Régulation journalière (a)



La partie hachurée de la figure représente la retenue nécessaire à la régulation journalière.
La formule s'écrit:

$$\bar{V}_d = (1,10 - 1,15) \times Q_G (24 - h) \times 3600 (m^3) \quad 32)$$

où 1,10 - 1,15 représente le coefficient de sécurité, adopté pour tenir compte des données insuffisantes et inexactes, de même que des erreurs de calcul.

2. Production périodique d'énergie

D'après les demandes de consommation d'énergie et de consommation d'eau, on divise l'alimentation en eau et en énergie en plusieurs périodes, d'après le débit entrant naturel. La première opération consiste à déterminer l'alimentation en eau et en énergie pendant les périodes autres que celle de la charge maximale et à déduire le volume de cette alimentation du débit entrant journalier. Ce qui reste sert pour la période de charge maximale. Donc:

$$Q_{\max} = \frac{Q_G \times 24 \times 3600 - (\bar{V}_1 + \bar{V}_2)}{h \times 3600} \quad (\text{CMS}) \quad 33)$$

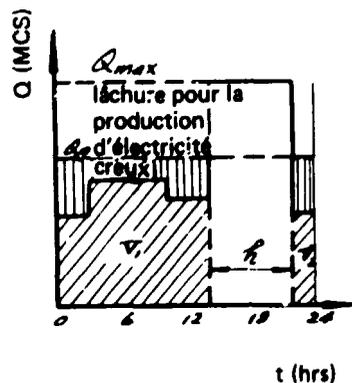
La puissance utile maximale d'écrit:

$$N_W = A \cdot Q_{\max} \quad H = A \left[\frac{Q_G \times 24 \times 3600 - (V_1 + V_2)}{h \times 3600} \right] \times H \quad 34)$$

où H désigne la différence entre le niveau normal de l'eau en amont et son niveau en aval (qui varie avec le débit correspondant).

La zone hachurée de la figure 4-6 représente l'emmagasinage requis pour la régulation journalière.

Figure 4-6
Régulation journalière (b)



Quant à la puissance de réserve et à la puissance saisonnière, la centrale au fil de l'eau et la centrale de régulation journalière ne diffèrent guère que dans un cas: s'il s'agit d'une centrale à régulation journalière d'assez forte puissance, peu éloignée du centre de charge et à conduite courte, il est possible de lui confier le surcroît de charge en vue de moduler la fréquence.

Lors de l'étude technique d'une grande centrale de préfecture ou d'arrondissement, il est bon de calculer la courbe théorique type de charge journalière du réseau et, par l'intermédiaire de la courbe d'énergie des apports quotidiens, de déterminer la puissance utile maximale de cette centrale. La première opération consiste à calculer la production d'énergie quotidienne disponible E_G ($E_G = 24 N_G$) selon celle des apports N_G . La deuxième opération consiste à considérer la charge du réseau et les caractéristiques de ses principales stations, puis de déterminer la part que prendra la centrale envisagée (c'est-à-dire la charge qu'elle assumera). Enfin, en rapportant la production disponible journalière à la courbe de charge journalière, on détermine la puissance utile maximale.

D) Centrale à régulation annuelle

Une telle centrale doit disposer d'un réservoir à régulation annuelle. Le débit entrant naturel sera réparti dans l'année pour satisfaire la demande d'énergie et les autres demandes.

La régulation s'opère selon le principe du bilan hydrologique à chaque période. La différence entre débit sortant et débit entrant est compensée par la variation de la retenue pendant cette période. Elle est donnée par la formule suivante

$$\Delta \bar{W}_N - \Delta \bar{W}_C - \Delta \bar{W}_I = \pm \Delta \bar{W} \quad (m^3) \quad 35)$$

- où
- $\Delta \bar{W}_N$ désigne le débit naturel qui se déverse dans le réservoir pendant une certaine période (m^3)
 - $\Delta \bar{W}_C$ désigne le prélèvement opéré sur le réservoir pendant la même période pour l'alimentation en eau de la circonscription (m^3) (y compris le trop-plein qui se déverse à la saison des crues)
 - $\Delta \bar{W}_I$ désigne les pertes d'eau qui se produisent dans le réservoir pendant la même période (m^3)
 - $\pm \Delta \bar{W}$ désigne la variation de la retenue pendant la même période.

Pour calculer la régulation de la retenue, connaissant le débit entrant et la consommation d'eau, on trouve facilement les dates de début et de fin de l'adduction d'eau par le réservoir, et on détermine ainsi la saison sèche. La formule du bilan hydrologique permet le calcul pour chaque période: ce qui donne les déficits en eau correspondants. Leur somme pour l'ensemble de la saison sèche donne le volume total d'eau que devra fournir le réservoir, c'est-à-dire le volume requis pour la régulation de la retenue.

Quant à l'énergie hydraulique théorique, pour un réservoir servant principalement à la production d'énergie ou à l'irrigation (deux fonctions à la fois dépendantes et indépendantes), son calcul a été indiqué dans diverses publications et ne sera pas repris ici.

V. TYPE DE MCH ET ETUDE PARTICULIERE

La puissance d'une centrale hydro-électrique est proportionnelle à la hauteur de chute et au débit. Donc, pour connaître l'énergie, il faut déterminer la dénivellation entre amont et aval.

Selon la façon de former la chute, les centrales se classent en trois types.

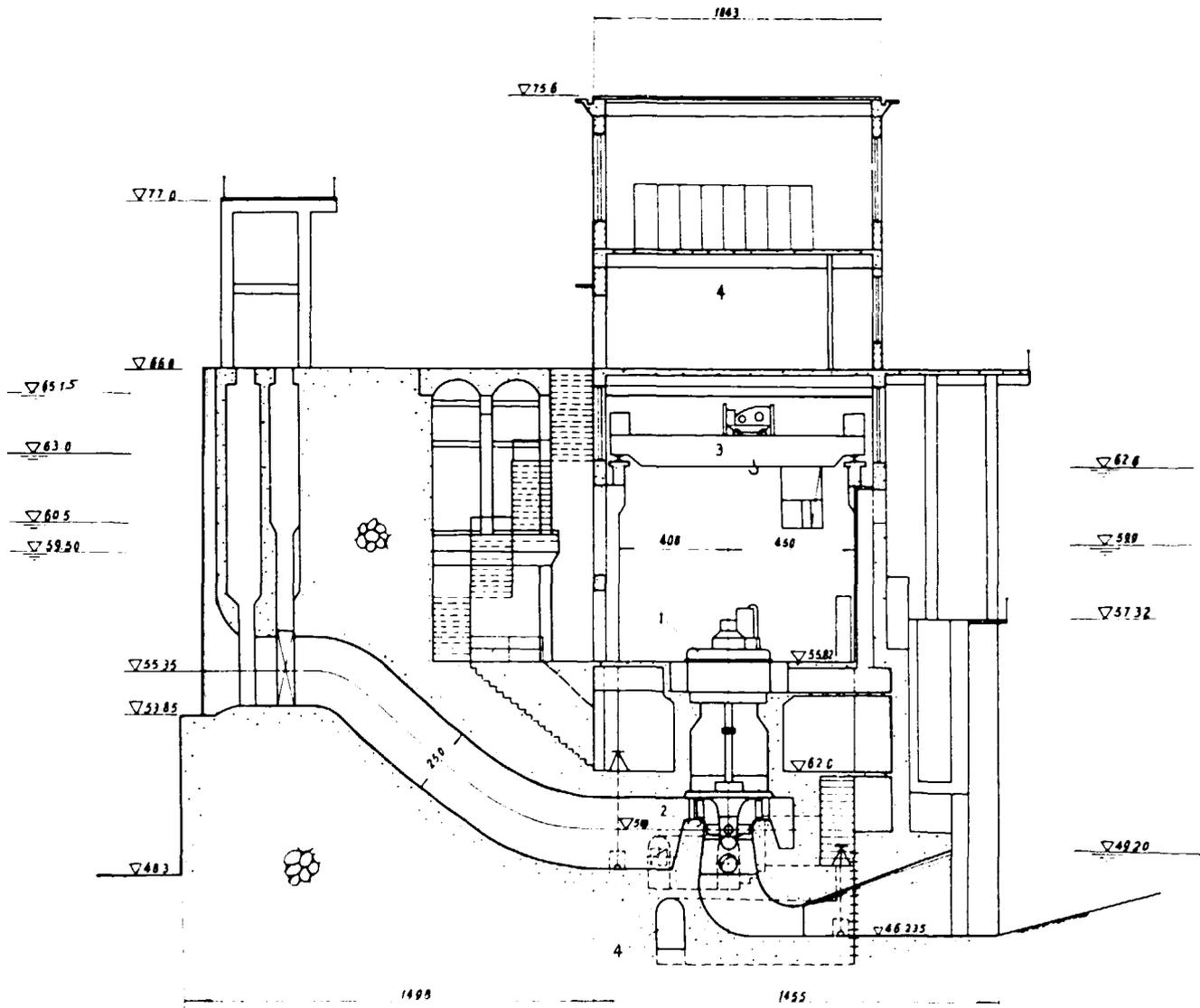
A) Centrale à barrage: dénivellation créée par le barrage

La construction d'un barrage fixe ou mobile retient le courant de la rivière et forme un lac artificiel qui élève le plan d'eau amont. Une dénivelée existe donc entre ce plan d'eau et le niveau aval. Une galerie ou conduite amène à la centrale l'eau de la retenue, et un groupe turbine hydraulique-générateur produit l'énergie. Selon la disposition de ces centrales, elles se subdivisent: certaines servent d'ouvrages de retenue, tandis que d'autres sont installées en aval du barrage.

1. Centrale hydro-électrique servant d'ouvrage de retenue

Les figures 4-7 et 4-8 représentent la MCH de Ganqi, dans la province de Hunan, construite dans le lit de la rivière. La stabilité de l'ouvrage est assurée par le poids combiné du barrage et de la centrale. La surface de drainage couvre 1 170 km², soit 96 pour cent du bassin de la rivière Mi. Il s'agit d'un projet de protection des eaux qui sert à la fois à l'irrigation, à la production d'énergie et à la navigation. La hauteur maximale du barrage est de 20,5 mètres et sa longueur de 454 mètres. L'ensemble comprend une station de pompage, une centrale hydro-électrique, une écluse, des passages pour bois flotté et le barrage. Dix groupes turbines hydrauliques-générateurs modèle DJ 510-LH-180 d'une puissance totale de 12 500 kW ont été montés dans la centrale. La chute théorique est de 10,5 mètres et le débit théorique de 160 MCS. La production d'une année moyenne atteint 76,8 millions de kWh. Cette centrale est rattachée au réseau méridional de la province.

Figure 4-8
MCH de Ganxi (2)



- (1) Generateur
- (2) Turbine
- (3) Pont roulant
- (4) Puits de drainage

Unites:
Hauteurs en m
Autres dimensions en cm

Figure 4–9
Centrale hydro-électrique du „Peuple”



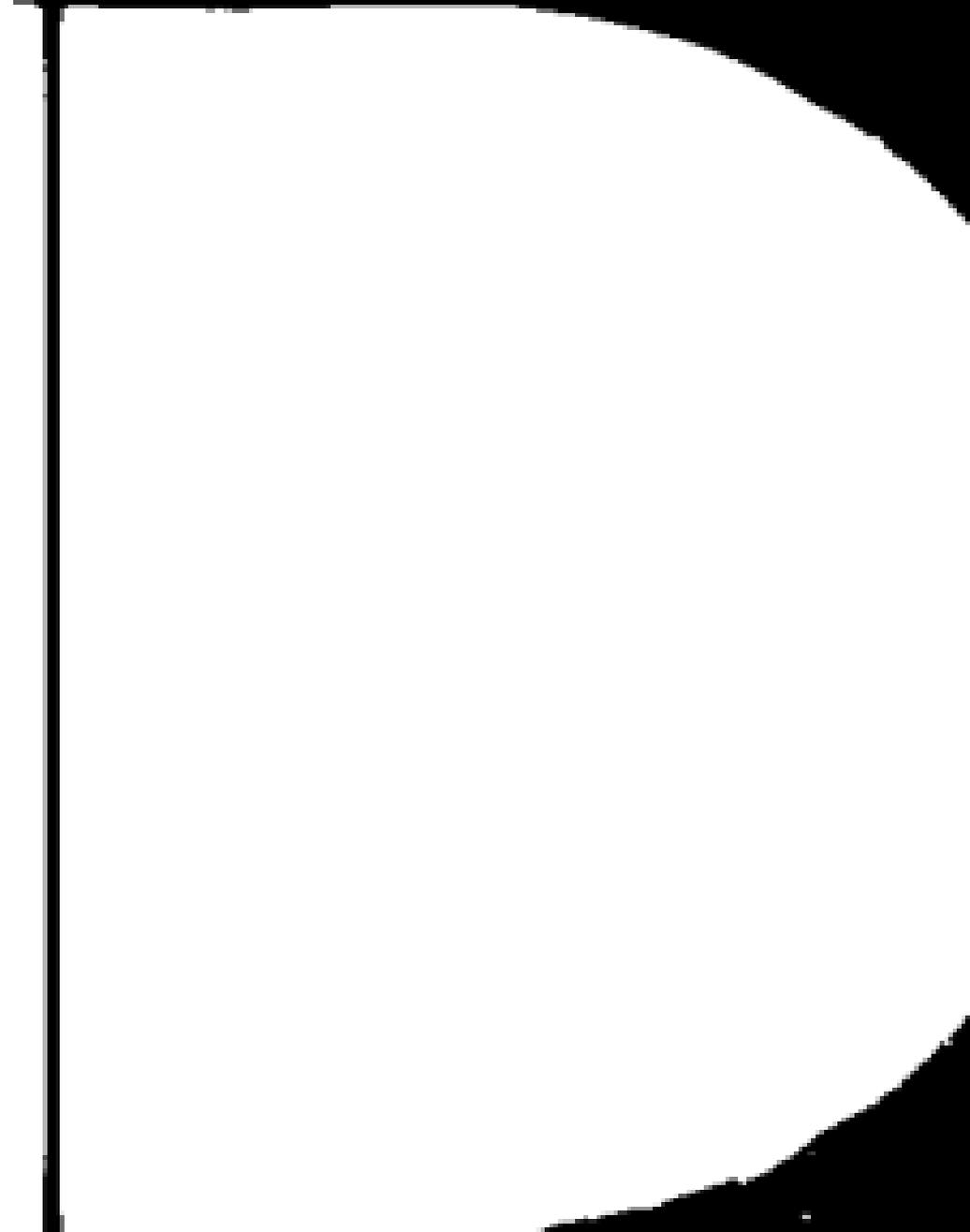
La figure 4–9 montre la petite centrale hydro-électrique construite sur le canal principal dans la zone d'irrigation de Tukiangyen, province de Sichuan. La chute est de 7 mètres, le débit de 16 MCS, et il y a trois groupes turbo-générateurs: deux de 320 kW et un de 125 kW. L'énergie produite sert pour 55 pour cent à l'agriculture et pour 45 pour cent à la consommation industrielle et domestique de la ville voisine. L'eau d'aval irrigue quelque 300 000 Mu de terres arables.

2. Centrale située en aval du barrage

Les figures 4–10, 4–11 et 4–12 montrent la centrale de Yanwotan, dans la province de Hunan. Elle est installée sur la rive droite au coude aval de la rivière. L'eau lui est amenée par une galerie de 3,5 mètres de diamètre. La surface de drainage couvre 457 km². Le débit en année moyenne est de 407 millions de m³ et la capacité du réservoir de 87,6 millions de m³ au niveau maximal normal. Le réservoir dispose donc de la capacité requise pour une régulation annuelle.

Figure 4-10
MCH de Yanwotan





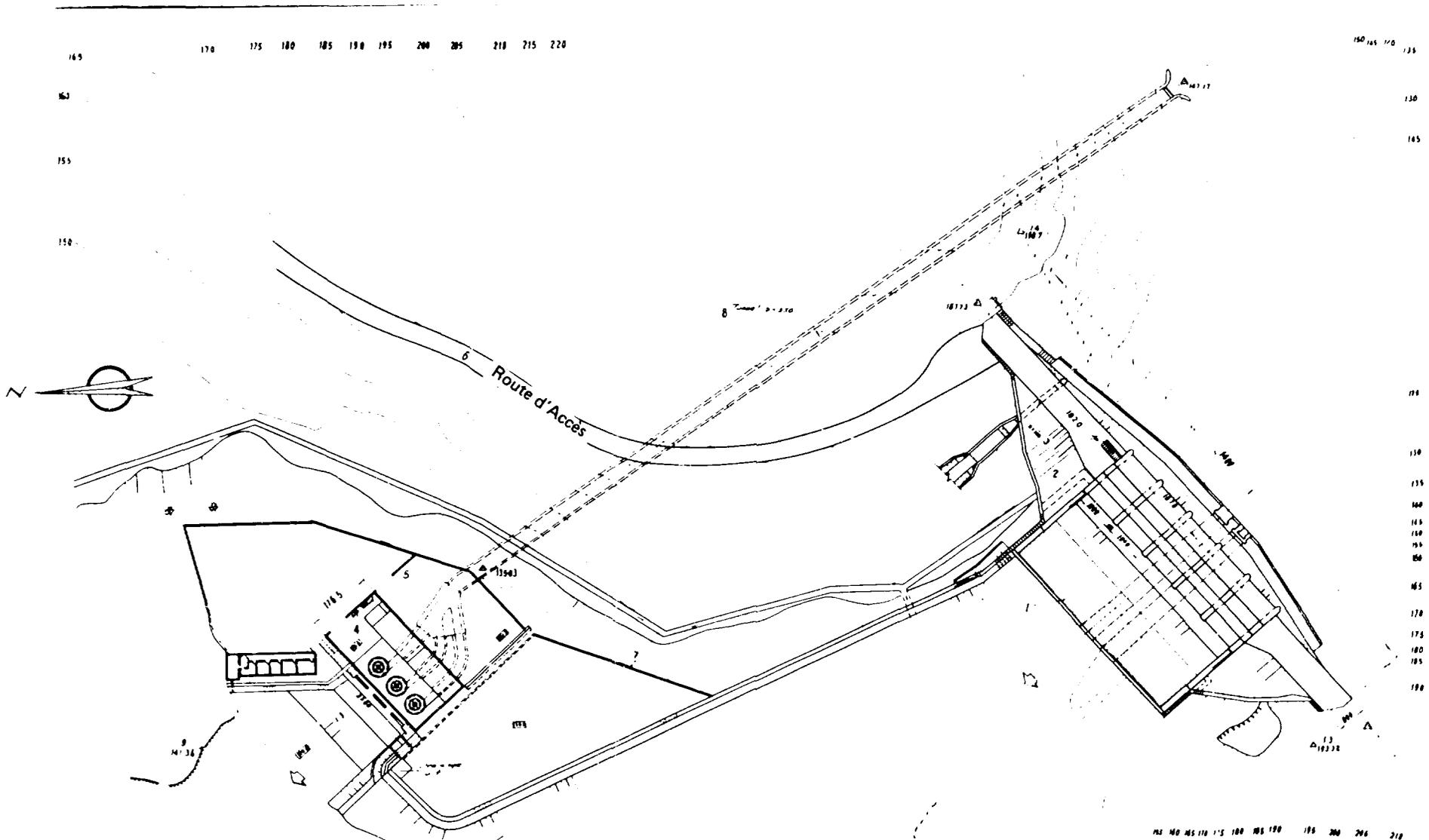


Figure 4-11
MCH de Yanwotan

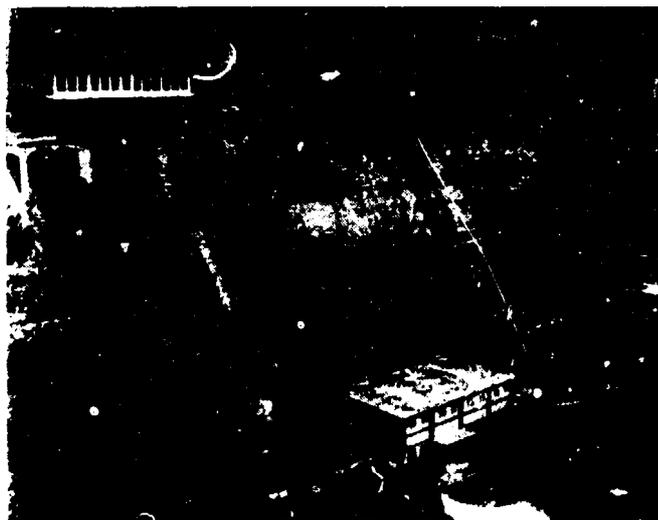
Unites:
Longueurs en cm

- (1) Barrage-poids évidé
- (2) Barrage non-déversant
- (3) Conduite d'irrigation
- (4) Usine
- (5) Poste de distribution
- (6) Route d'accès
- (7) Fossé de drainage

L'ouvrage comprend essentiellement un barrage-poids évidé, à déversoir, construit en maçonnerie, une centrale et une galerie. Le barrage a une longueur en crête de 140 mètres et une hauteur maximale de 66 mètres. La centrale dispose d'une puissance totale installée de 9 200 kW, fournie par deux groupes HL 230-LJ-134, de 3 000 kW chacun, et par un groupe HL 123-LJ-140. Le débit théorique fourni aux turbines est, respectivement de 12 et de 12,6 CMS, et la chute utile maximale est de 50 mètres. La production annuelle est de 33,9 millions de kWh. Etant donné les caractéristiques de l'alimentation à fournir aux industries gérées par l'arrondissement et la pleine utilisation de l'énergie saisonnière, cette centrale fonctionne en parallèle avec une petite centrale thermique de 3 750 kW également gérée par l'arrondissement. En période de hautes eaux, le rôle principal lui revient, tandis qu'en période de basses eaux, la centrale thermique complète l'alimentation. Ce type de réseau d'arrondissement, comprenant une centrale hydro-électrique et une centrale thermique, est tout à fait judicieux. La centrale hydro-électrique de Yanwotan alimente non seulement l'arrondissement, mais fournit aussi la puissance réactive du réseau central de la province, améliorant ainsi la qualité de l'alimentation.

La figure 4-13 montre la centrale hydro-électrique de Yunxiao, dans la province de Guangdong. Elle est installée au pied d'un barrage poids en maçonnerie sans déversoir. La chute utile est de 31 mètres et l'installation compte deux groupes de 500 kW. L'eau d'aval sert à l'irrigation.

Figure 4-13
MCH de Yunxiao

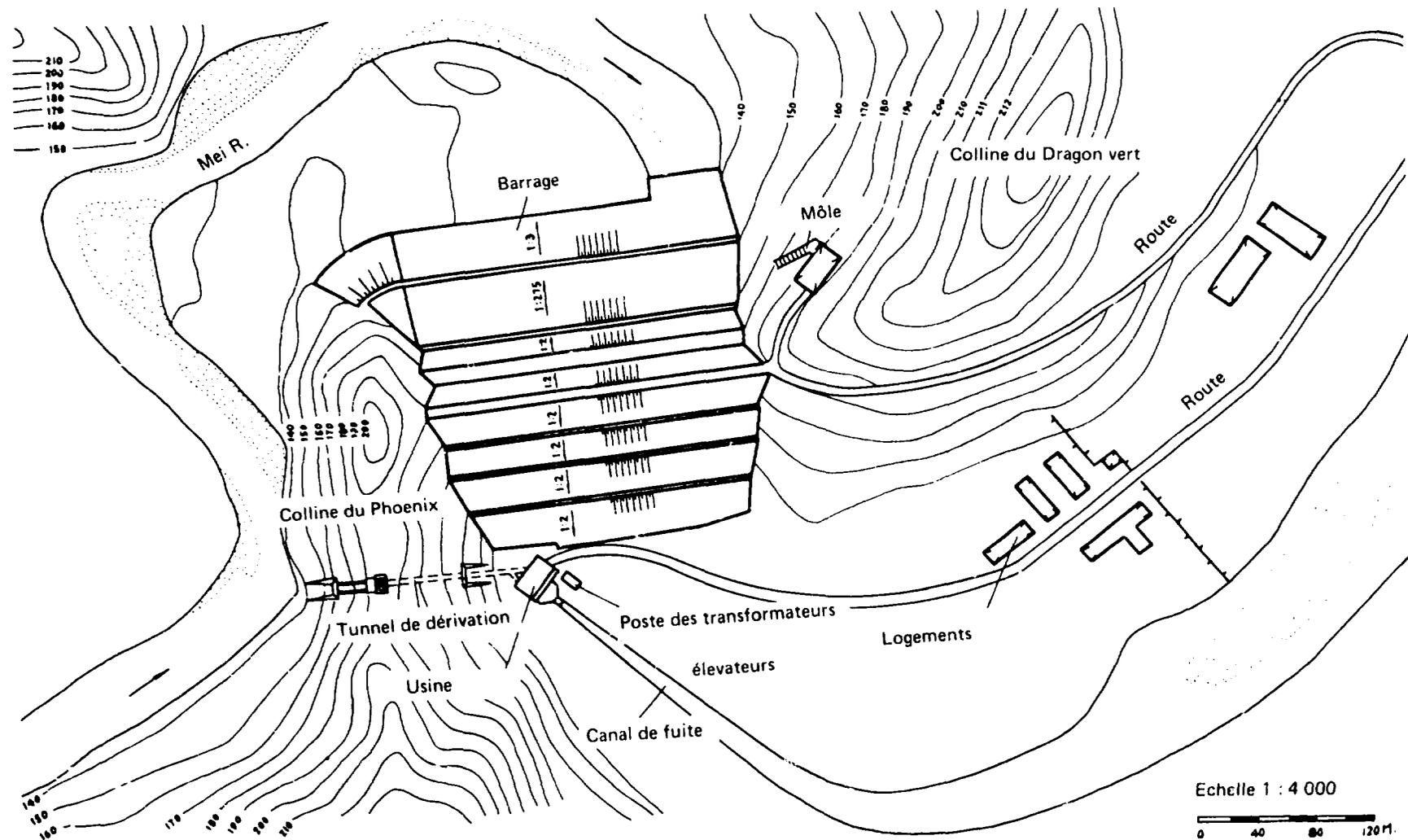


Les figures 4-14 et 4-15 montrent la centrale I construite sur la Mei. Le barrage en terre, d'une hauteur de 47 mètres, a une capacité de 65,5 millions de m³. La puissance installée est fournie par quatre groupes de 1 250 kW. Inaugurée en 1962, la centrale a été achevée en 1967. L'eau d'aval peut servir à irriguer 100 000 parcelles arables et elle sert aussi de source d'énergie à la chaîne de centrales installées en aval.

Figure 4-14
MCH I de Meixi



Figure 4-15
 Plan directeur de la MCH de MEIXI
 tranche I



En général, les centrales à barrage se caractérisent comme suit:

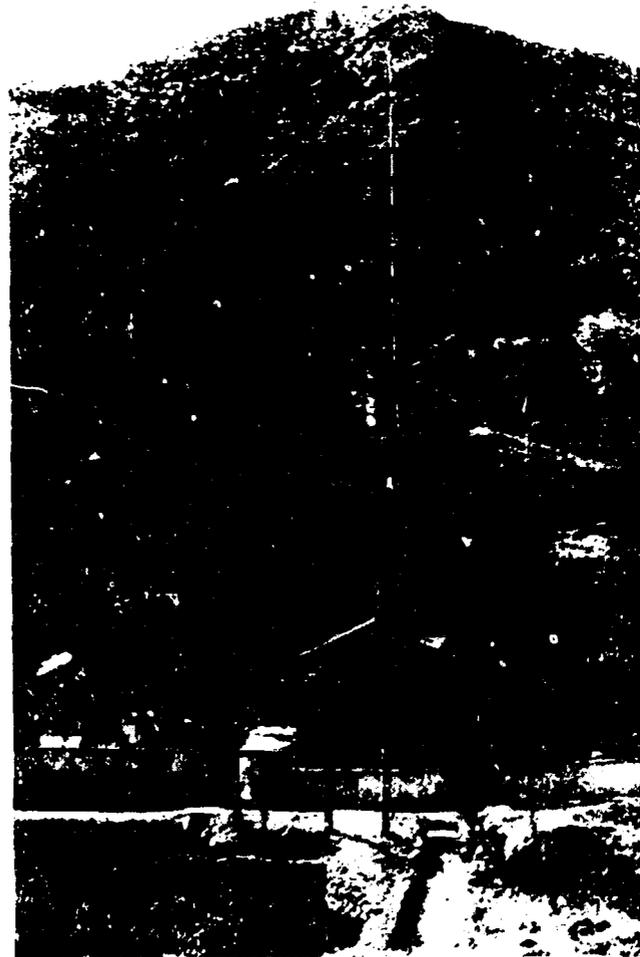
- Le barrage fixe ou mobile est construit sur la rivière pour former une retenue et fournir la dénivellation. Le réservoir est à usages multiples. Pour les MCH, il sert d'ordinaire à l'irrigation, à la rétention des crues et à la navigation.
- La centrale est située près du barrage. La conduite d'eau est courte: donc, la centrale peut recevoir un assez fort débit théorique.
- Si on construit un barrage élevé pour obtenir une haute chute, il faut tenir compte des conditions géologiques, de la technologie de la construction et du remplissage du réservoir.

B) Centrale à dérivation: chute assurée par la conduite

Dans ce type de centrale, la chute est surtout assurée par une conduite. Sur la rivière, on construit un barrage de faible hauteur ou un vannage, pour détourner le courant vers la conduite, galerie, tunnel, bief, etc., et finalement vers la centrale. Ce type convient aux cours moyen et supérieur des rivières dont il est impossible de drainer le bassin amont et qui forment en aval des rapides, des chutes ou des coudes.

La figure 4–16 montre la centrale du Double dragon. Un canal de 2 600 mètres a été construit pour amener l'eau de trois points: la source du Double dragon, le réservoir de Lotien et le réservoir des Neuf dragons. Une conduite forcée de 0,45 mètre de diamètre et de 407 mètres de long relie le canal à la centrale. La chute est de 196 mètres. La puissance installée est de 512 kW et le débit théorique de 0,6 MCS.

Figure 4-16
MCH du Double dragon



La figure 4-17 montre la centrale III^e de Baizhangtan dans la province de Hubei. Le canal de dérivation est long de 2 800 mètres. La chute est de 66,5 mètres. Le débit théorique est de 2,7 MCS. Un groupe de 800 kW et un de 1 500 (avec les mêmes turbines modèle HL 702-WJ-50) sont installés dans la centrale. La production annuelle est de 3 millions de kWh.

Figure 4-17

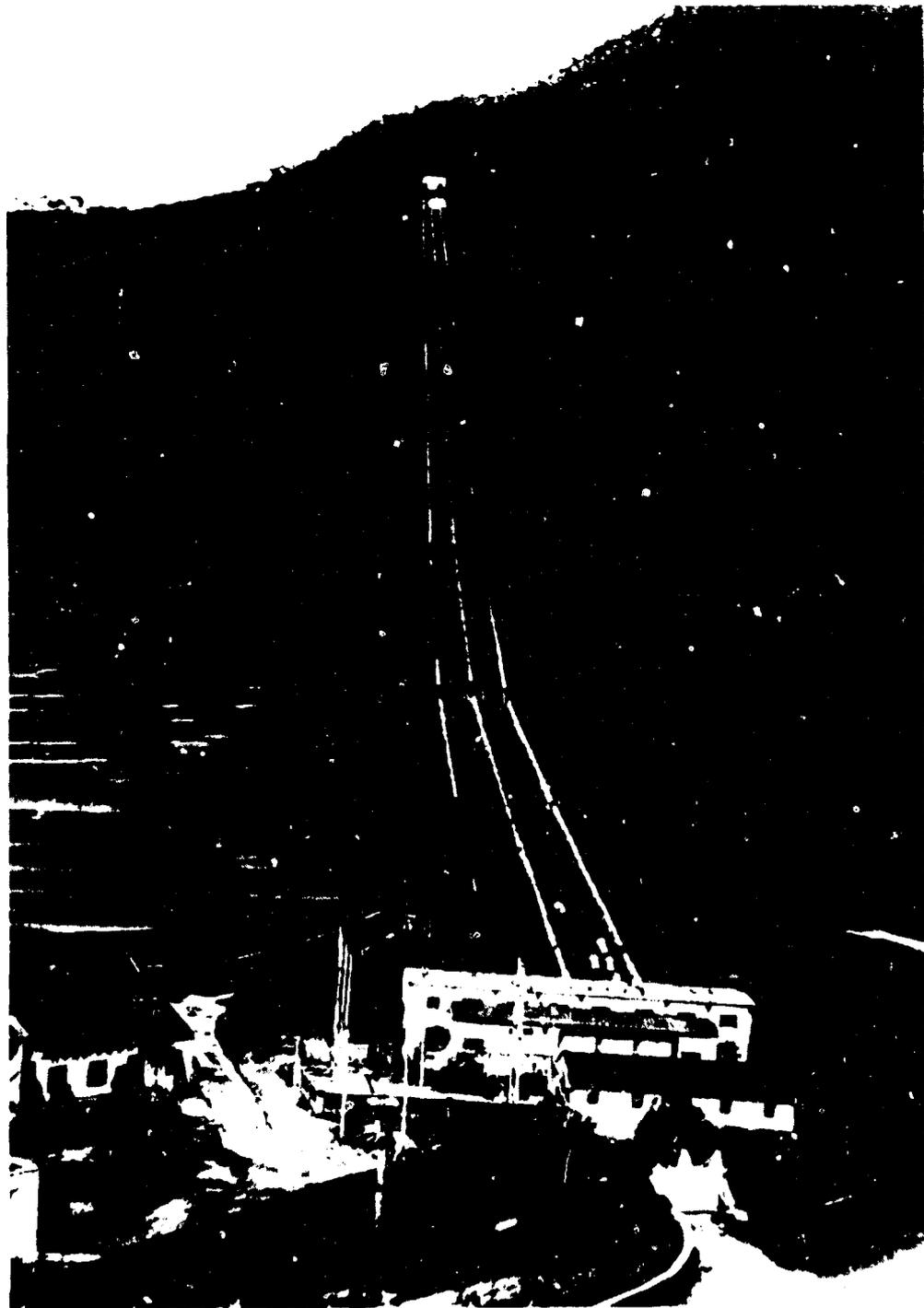
MCH de Baizhangtan





La figure 4-18 montre la centrale de Qingtong dans la province de Guangdong. C'est la station maîtresse de l'arrondissement: trois groupes y sont installés, chacun d'une puissance de 1 600 kW. Le débit théorique est de 1,6 MCS par groupe. Les ouvrages d'aménée, comprenant galeries, tuyaux et rayères (en béton précontraint) à siphon inversé, ont 23 km de long. La chute est de 142 mètres. La conduite forcée est une canalisation de 0,8 mètre de diamètre en béton précontraint.

Figure 4-18
MCH de Qingtong



Dans diverses provinces de Chine existent aussi des centrales de haute chute dépassant 200 mètres. Par exemple, celle de Huangtonjiang, dans la province de Guangdong, a une chute de 218 mètres avec un débit de 1,5 MCS. La puissance installée provient de trois groupes de 800 kW chacun. Les conduites forcées sont en béton précontraint. A la centrale de Lantong, dans la région autonome de Guangxi Zhuang, la chute, d'une hauteur de 430 mètres, est créée par un canal de plus de 2,8 kilomètres de long. La conduite forcée mesure 1 100 mètres et le débit théorique est de 3 MCS. La puissance totale installée est fournie par trois groupes de 3 200 kW chacun.

Les figures 4-19 et 4-20 montrent la centrale de Chongshan dans la province de Hunan. La chute théorique est de 612 mètres: c'est actuellement en Chine la plus haute des MCH à dérivation. La surface de drainage ne couvre que 4,18 km² et la capacité effective du réservoir est de 2,5 millions de m³. Le canal d'aménée et la conduite forcée (diamètre 35 CM) mesurent, respectivement, 1 045 mètres et 1 446 mètres. Deux groupes modèle CD10-WJ-90/1 à turbine hydraulique à action sont installés à présent. Chaque groupe a une puissance de 500 kW et un débit théorique de 0,12 MCS. La production d'une année moyenne est de 4,17 millions de kWh. Elle sert pour 69 pour cent à l'agriculture et pour 31 pour cent aux petites industries et à la transformation des produits d'origine agricole.

Figure 4-19
MCH de Chongshan (1)

Unités:
Hauteurs en m
Autres dimensions en cm

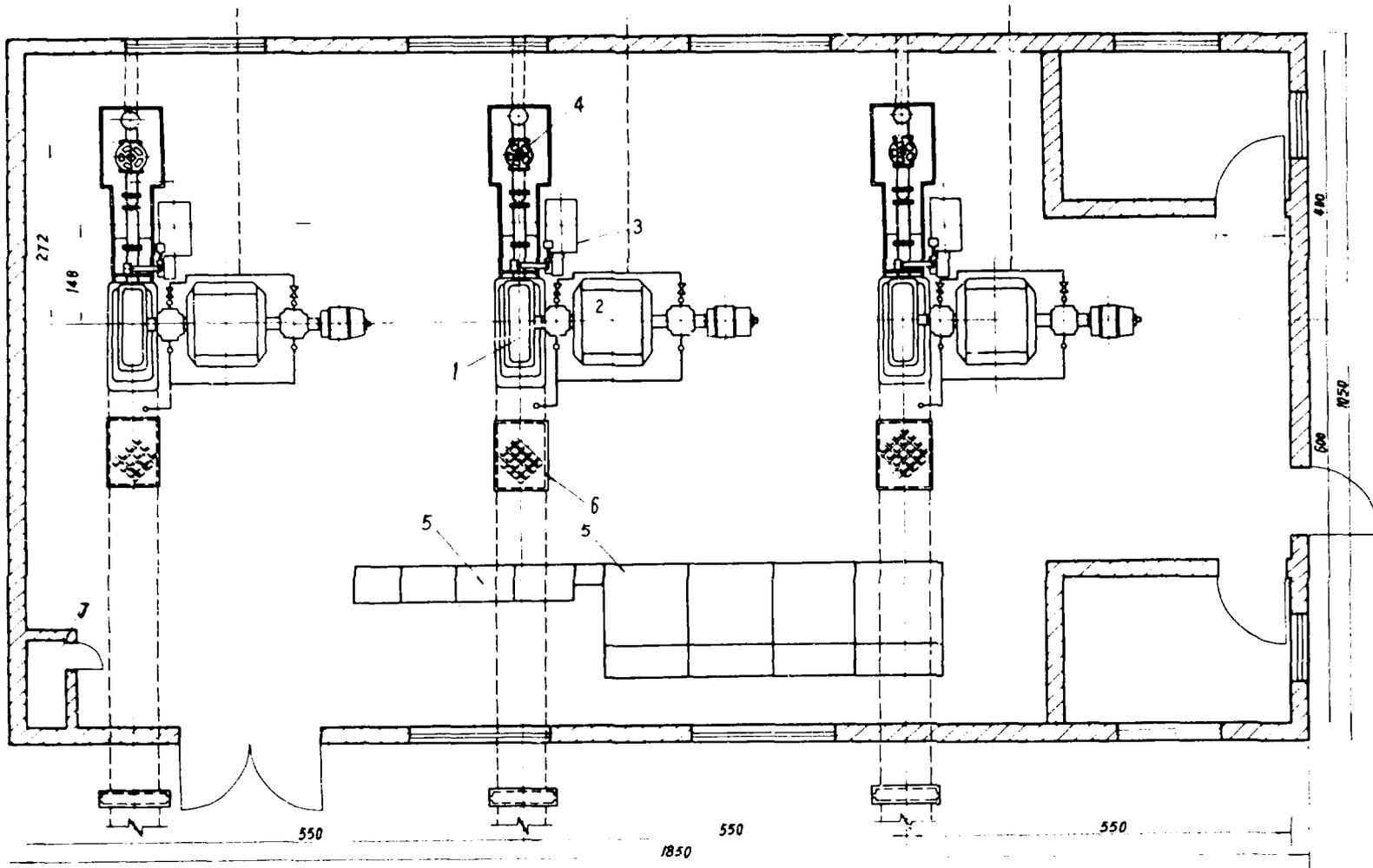
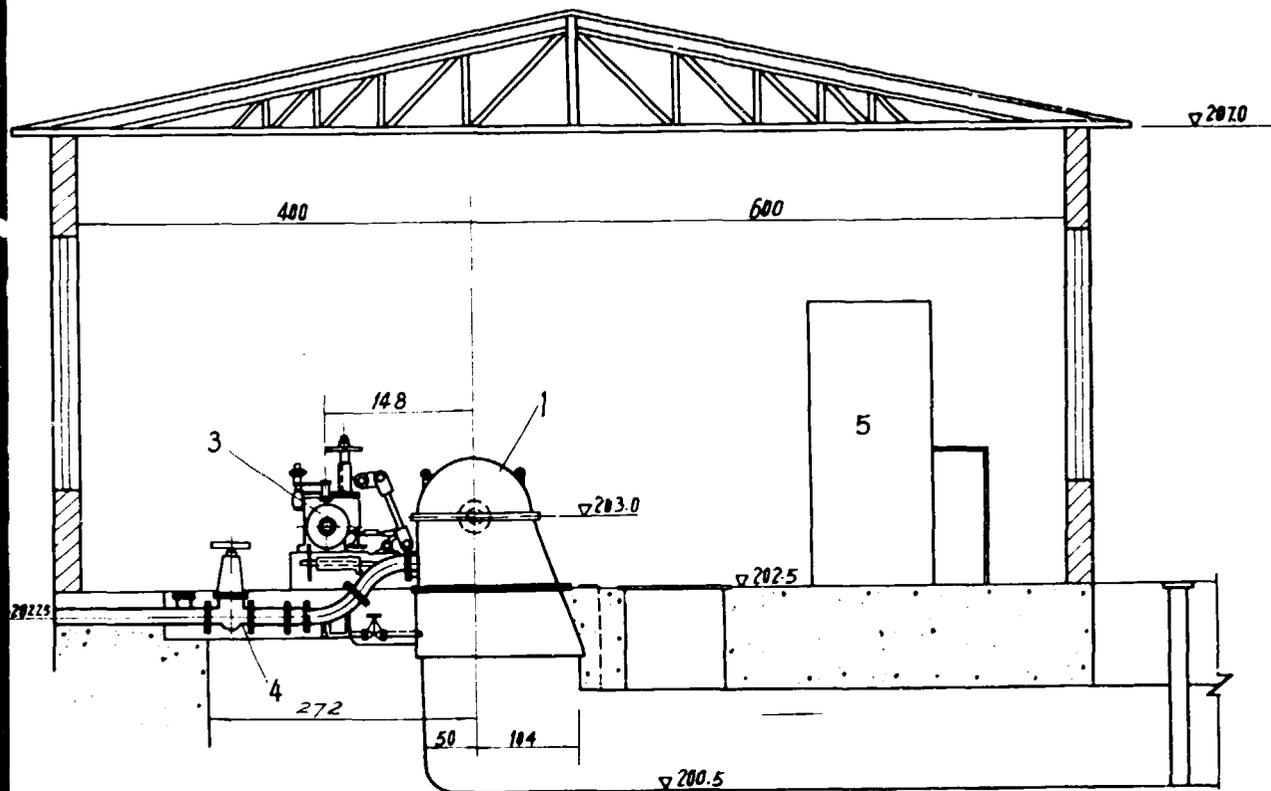


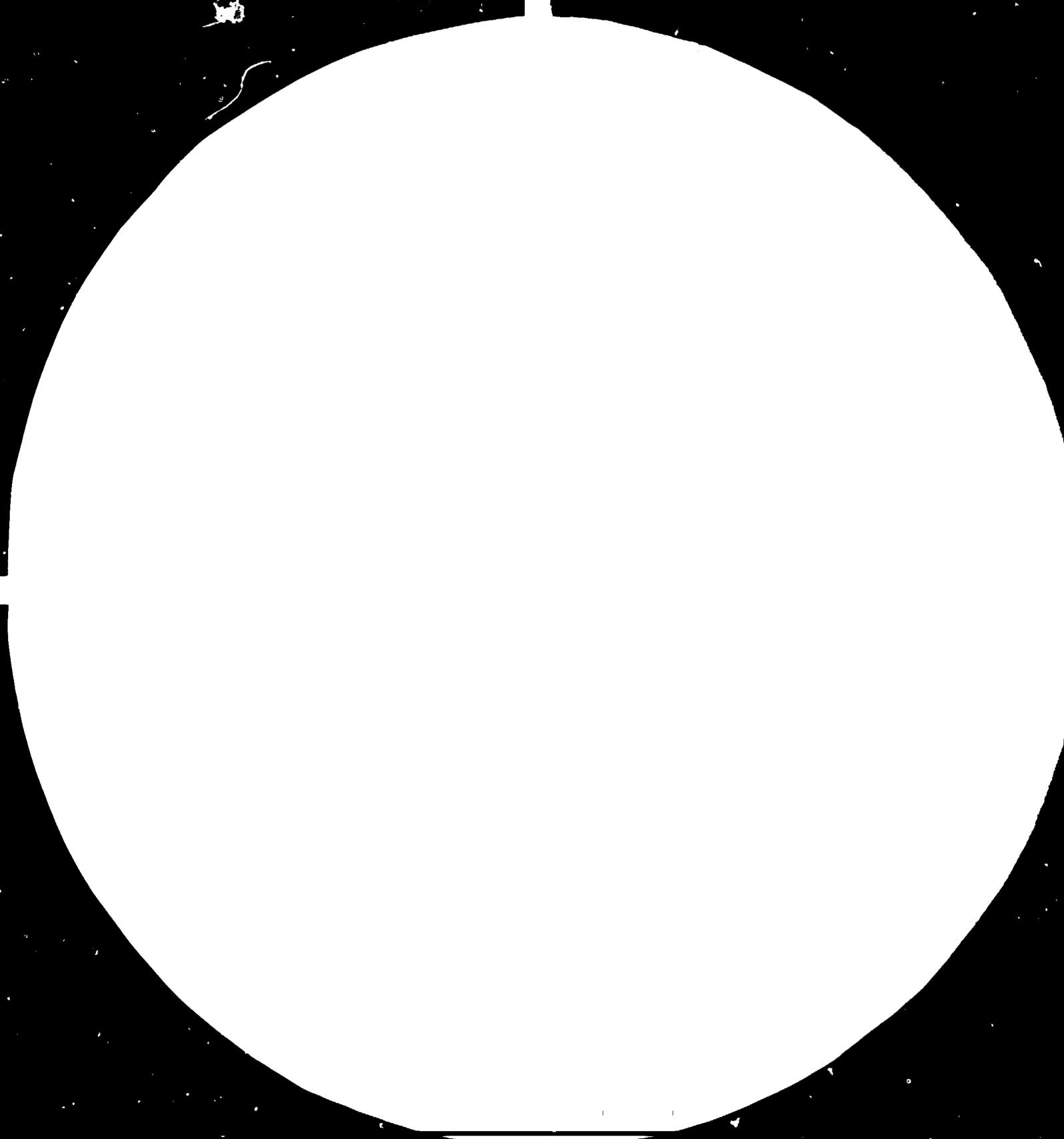
Figure 4-20
MCH de Chongshan (2)

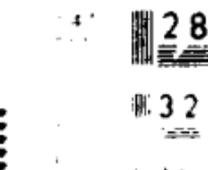


Vue en coupe

Unités:
Hauteurs en m
Autres dimensions en cm

83 09 30





MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS-1963-A

La figure 4-21 présente une photographie de la MCH de Qing Yuan dans la province de Fujian. Le canal d'aménée a huit kilomètres de long. La chute a une hauteur de 46 mètres. Le débit théorique est de 2,6 MCS. Trois groupes de 265 kW y sont installés.

Figure 4-21
MCH de Qing Yuan



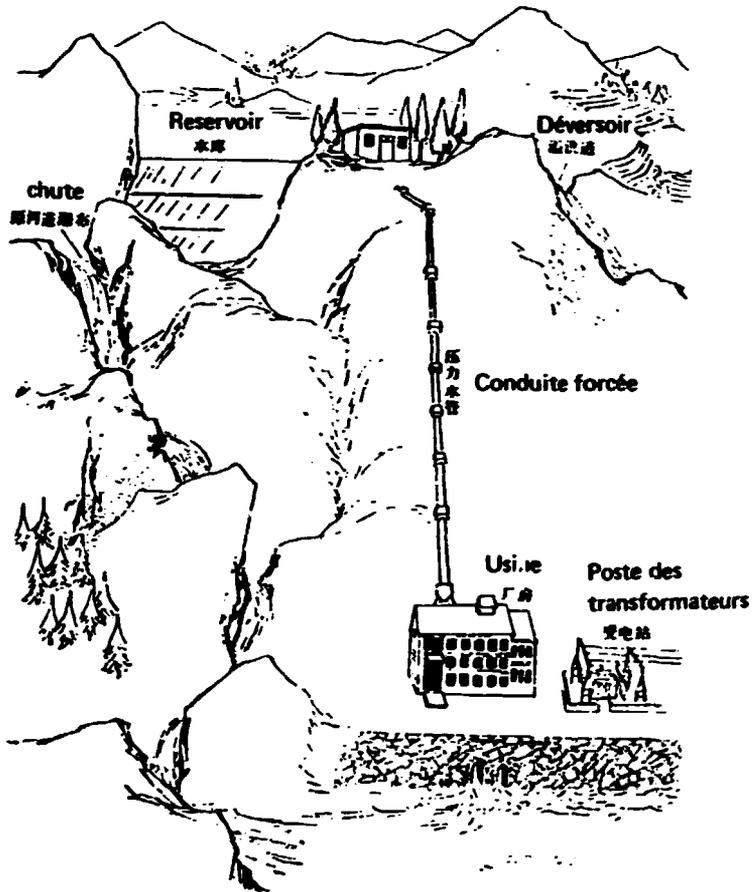
En général, les MCH à dérivation se caractérisent comme suit:

- Dans les régions montagneuses, si la topographie s'y prête, une conduite relativement courte peut former une grosse chute. Grâce au barrage bas ou au vannage de dérivation, le réservoir se reconstitue lentement.
- Pas de retenue régulatrice: l'eau des torrents situés entre le barrage et la centrale ne peut servir à la production d'énergie.

C) Centrale «mixte»

Dans certains cas, la chute est assurée en partie par le barrage et en partie par la conduite. C'est ce qu'on appelle la centrale mixte. Dans les régions montagneuses, la plupart de ces centrales servent à la fois à retenir la crue et à irriguer, sauf quelques-unes consacrées à produire de l'énergie. La figure 4-22 représente la centrale de Zaiqi dans la province de Fujian. Elle est installée près des chutes du Wuyantou. En amont, s'étend une large vallée plate qui a permis de construire une retenue, tandis qu'en aval, la rivière a une pente rapide. L'ouvrage est disposé comme suit. En amont des chutes, on a construit un barrage en terre. Sa hauteur est de 17,2 mètres et sa capacité effective de 3 millions de m³. La centrale est située en aval. L'ouvrage d'amenée comprend une galerie de 130 mètres de long, dont la pente est de 7,7 pour cent et une conduite forcée de 418 mètres de long. La chute totale est de 240 mètres. Le débit théorique est de 2,1 MCS et l'installation comprend deux groupes de 2 160 kW chacun. La centrale sert surtout à produire de l'énergie. En aval, l'eau peut servir à irriguer et les atteintes de l'inondation se trouvent quelque peu réduites.

Figure 4-22
MCH de Zaixi



Au total, en ce qui concerne la formation de la chute, on distingue essentiellement les centrales à barrage et celles à dérivation. Le type mixte combine ces deux grandes catégories. S'il existe des chutes, rapides, cascades, coudes, lacs d'altitude ou possibilités de capture, on préfère d'ordinaire la centrale à dérivation ou la centrale mixte, comme le montre la section D suivante.

D) Dispositifs divers d'exploitation de l'énergie hydraulique

1. Utilisation des chutes

Les chutes offrent une dénivellation naturelle. D'ordinaire, leur régime varie peu dans l'année: elles offrent donc des possibilités idéales d'exploitation.

Dans la province de Yunnan, une chute de 40 mètres sert à produire de l'énergie à la centrale de Dishin, avec une puissance installée de 3 250 kW.

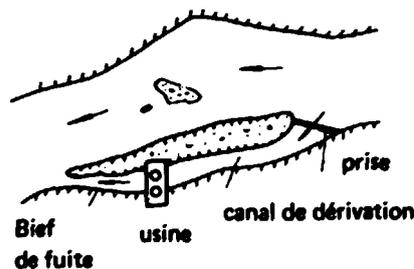
Dans la province de Tongchen, province de Hubei, on trouve plusieurs chutes près du Paizhantan. La dénivellation formée par la construction d'une conduite de 400 à 500 mètres atteint maintenant 140 mètres. Les centrales utilisant des chutes sont moins coûteuses et exigent moins d'ouvrages: elles sont donc préférables.

2. Utilisation des rapides et cascades

Dans les régions montagneuses, les cours d'eau sont d'ordinaire coupés de rapides (sur plusieurs mètres ou plus encore) ou de cascades, qui peuvent servir à produire de l'énergie. Si le courant est abondant et si la topographie s'y prête, il suffit d'une digue basse, et il n'est pas besoin de barrage pour dériver l'eau, comme le montre la figure 4-23. Des mesures appropriées doivent être prises pour protéger la centrale et le canal des atteintes de l'inondation.

Figure 4-23

Utilisation d'un rapide

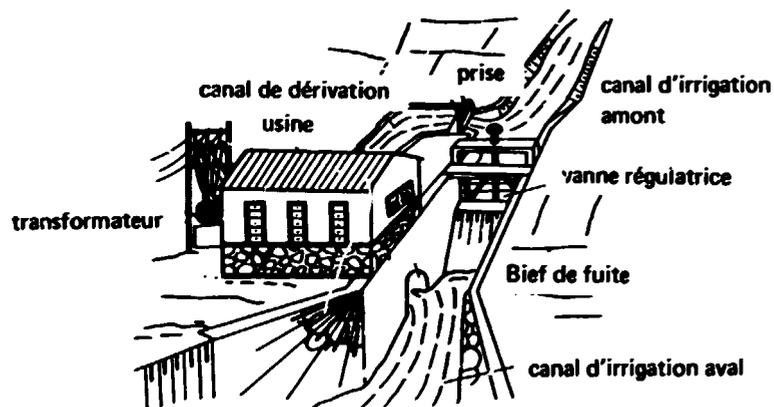


3. Utilisation des cascades

La figure 4-24 montre la centrale hydraulique de la province de Guangdong, qui utilise des cascades. L'usine et la cascade sont aménagées séparément. La centrale est établie sur un réseau d'irrigation dont on peut utiliser les chutes. Tous les ouvrages existants peuvent servir, et il suffira de construire bientôt une usine nouvelle. Ce mode d'exploitation de l'énergie hydro-électrique réduit considérablement le coût.

Figure 4-24

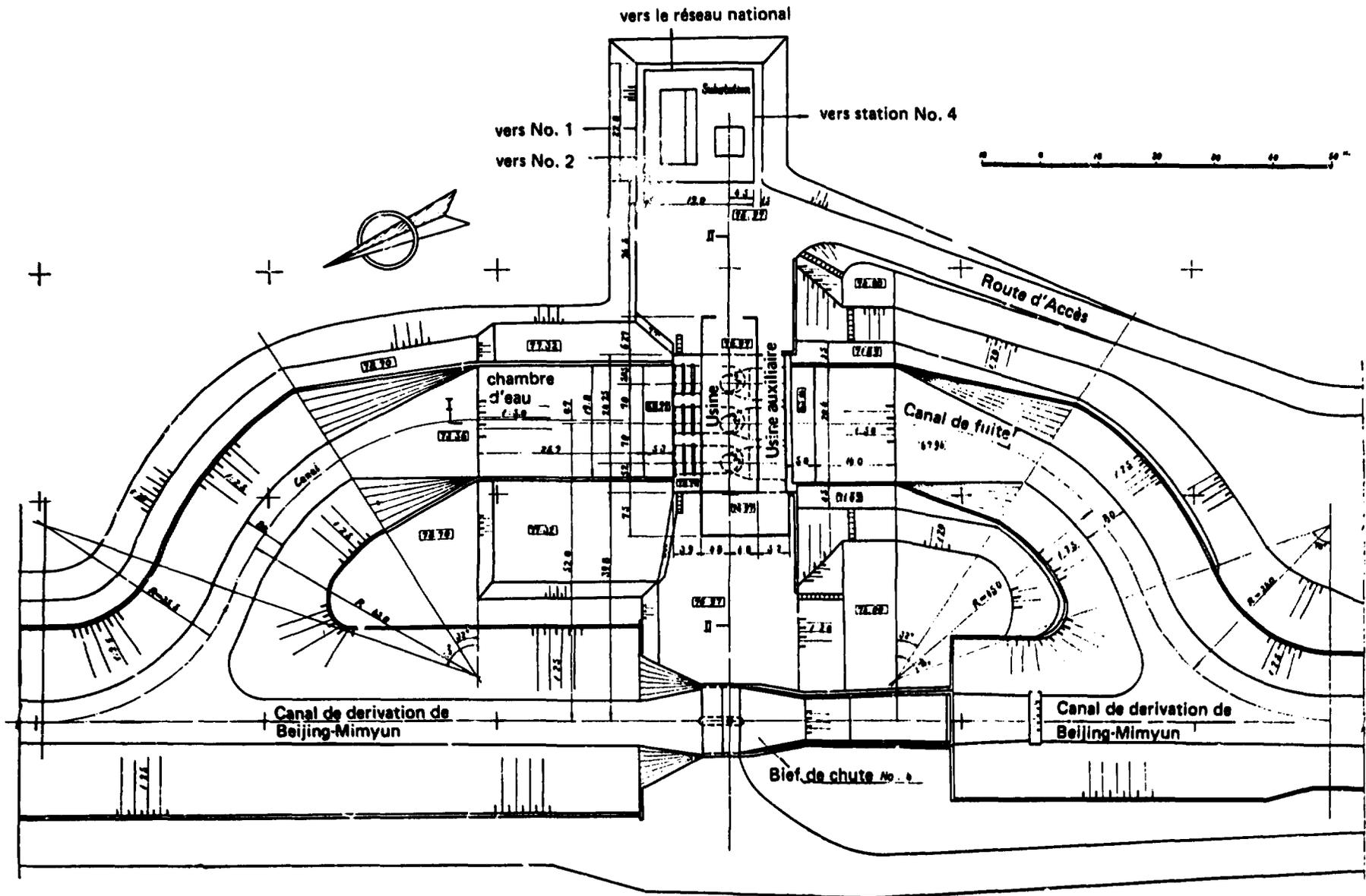
Disposition d'une centrale latérale à la chute



Les figures 4-25 et 4-26 montrent des centrales installées sur le canal qui conduit à Beijing les eaux du réservoir de Mimyun. Il présente, sur 30 kilomètres, huit cascades d'une hauteur totale de 35 mètres. Leur énergie est exploitée par cinq MCH, d'une puissance installée totale de 11 400 kW.

Figure 4-25

Plan de la centrale No. 3 sur le canal de Beijing-Mimyun



Le tableau 4-11 donne la chute théorique et la puissance installée de ces cinq centrales.

Tableau 4-11
Puissance installée de la chaîne de centrales
sur le canal de Mimyun à Beijing

Caractéristiques	Centrale				
	I	II	III	IV	V
Chute théor. que nette (m)	6,5	4,7	6,5	4,7	4,5
Puissance installée (kW)	3 x 1.000	3 x 600	3 x 1.000	3 x 600	3 x 600

Pour réduire le nombre des groupes et des tensions correspondantes, ces cinq centrales utilisent le même type de turbine modèle ZD 760-LH-200. Selon que la chute utile est de 6,5 ou de 4,5 mètres, elles sont couplées avec un générateur de 1 000 kW (250 tpm) ou de 600 kW (214,3 tpm).

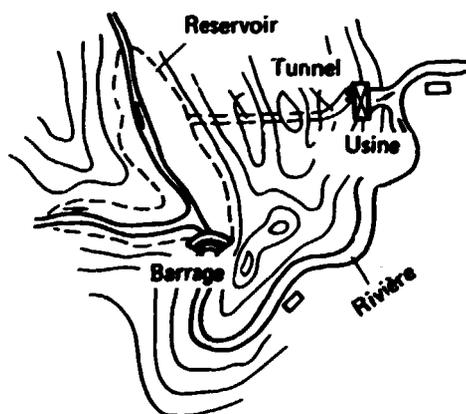
Pour un volume d'eau annuel de 500 à 700 millions de m³, on estime la production annuelle de ces cinq centrales entre 28 et 39,4 millions de kWh.

4. Utilisation des coudes

Dans certaines régions montagneuses, les vallées et les rivières sinuent beaucoup. Dans certains cas, le coude qu'elles forment se referme presque, et la pente est assez forte. Une courte conduite coupant à travers ce coude permet de former une chute qui fournira de l'énergie.

Le dessin de la figure 4-27 présente la centrale de la Voie d'eau, dans l'arrondissement du Dragon vert, province du Hubei. La rivière forme un coude de sept kilomètres de long, au travers duquel on a formé une galerie de 1580 mètres. La chute ainsi formée est de 85 mètres. La puissance totale installée est de 1 375 kW. C'est là une maîtresse centrale de l'arrondissement.

Figure 4-27
MCH de la Voie d'eau alimentée par galerie

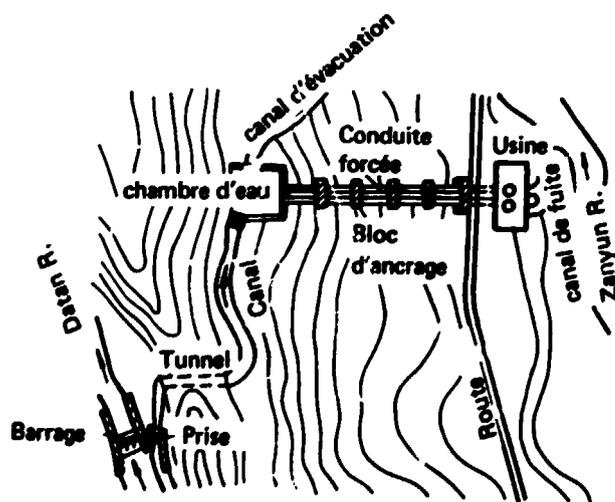


5. Dérivation transfluviale

Dans certains cas, fréquents dans les régions de colline ou les réseaux hydrographiques, une dénivellation existe entre deux rivières ou deux canaux peu éloignés. On peut alors envisager une capture par dérivation transfluviale pour produire de l'énergie. L'eau prélevée dans la rivière supérieure, dont le courant est ainsi réduit, s'écoule dans la rivière inférieure et la grossit. L'aménagement de cette capture artificielle doit être étudié dans son ensemble compte tenu des besoins de l'irrigation de la navigation, de l'adduction d'eau, etc., en aval. Une analyse technico-économique s'impose aussi.

La centrale du Datan, dans la province de Guangdong, est un exemple d'une telle dérivation entre bassins fluviaux. On a construit une galerie de 80 mètres et un canal de 200 mètres pour détourner de l'eau du Datan dans une petite rivière située plus bas (figure 4-28). La chute est de 210 mètres et la puissance totale installée de 640 kW.

Figure 4-28
MCH du Datan



6. Utilisation des lacs d'altitude

Si au-dessous d'un lac d'altitude se trouve une rivière ou un autre lac, il est possible de produire de l'énergie en amenant de l'eau du lac supérieur à la rivière ou à l'autre lac.

7. Utilisation de l'énergie des marées

Le littoral de la Chine est très étendu et les estuaires y sont nombreux. En maints points, il est possible d'utiliser l'énergie des marées. Les usines marémotrices se caractérisent par une basse chute et un gros débit; la complexité de leur construction les rend onéreuses. Actuellement, la Chine n'en exploite que quelques unes:

- à Dalain, arrondissement de Shunde, province de Guangdong:
puissance installée 144 kW;
- à Kaotan, arrondissement de Xiangshan, province de Zhejiang:
hauteur de la marée environ 4 mètres; débit théorique 8,5 MCS; puissance installée 275 kW;
- à Jing gong, arrondissement de Rushan, province de Shandong:
puissance installée 165 kW;
- à Liuho:
l'énergie est fournie par les marées de l'estuaire du Yantze avec une puissance installée de 80 kW.

Dans l'ensemble, ces usines marémotrices pilotes sont de petite taille.

La première qui utilise les deux sens de la marée est récemment entrée en service (n^o. 1). Elle est située à l'entrée de la baie de Luoqi, dans l'arrondissement de Wenling, province de Zhejiang, où la marée est forte, avec une hauteur maximale de 8,93 mètres. On prévoit d'installer six groupes turbo-générateur de 500 kW.

8. Interception des courants de fond ou captage des sources pour la production d'énergie

Dans l'arrondissement de Liyang, province de Jiangsu, une équipe de production a creusé des étangs sur une cinquantaine d'hectares pour servir de collecteurs aux sources et ruisseaux. L'eau accumulée dans la journée doit être utilisée à produire de l'énergie le soir. La MCH a une puissance de 3,2 kW et une chute de huit mètres.

Dans l'arrondissement de Nixing, province de Jiangsu, on a construit un mur de parafouille en maçonnerie de pierre pour retenir le courant de fond et élever le plan d'eau en vue de produire de l'énergie. Une commune populaire de l'arrondissement du Dragon vert dans la province de Hubei procède de même. Une centrale dotée d'une installation de 2 groupes de 40 kW a été construite: la chute théorique est de neuf mètres et le débit de 2 MCS.

VI. MONTAGE ELECTRIQUE ET POSTE DE TRANSFORMATEURS-ELEVATEURS

L'installation électrique des MCH, différant en cela du génie hydraulique, ne dépend guère du milieu naturel. Donc, malgré des caractéristiques particulières dans les différentes minicentrales, l'installation électrique reste essentiellement la même.

Actuellement, on trouve surtout en Chine les tensions suivantes. Pour un générateur d'une puissance inférieure à 500 kW, la tension est généralement de 400 V: un transformateur l'élève à 10,5 kV sur la ligne de transport. Le rayon de desserte ne dépasse pas 15 kilomètres. Pour les groupes générateurs d'une puissance allant de 500 à 6 000 kW, la tension est généralement de 6,3 kV. Pour le transport, elle peut rester la même ou être portée soit à 10,5, soit à 38,5 kV, parfois même à 110 kV.

Pour transporter le courant de centrales précédemment construites, on a adopté une tension de 6,3 kV, récemment remplacée par 10,5 kV. La tension de 3,15 kV précédemment utilisée est maintenant abandonnée.

On trouve en Chine de nombreux types de montages électriques. Les plus fréquents sont:

1. La barre omnibus unique, à la tension du générateur, avec ou sans sectionneur (figures 4-29 et 4-30).
2. Le bloc générateur-transformateur (figure 4-31).
3. Le poste transformateur élevant la tension à 38,5 ou 10,5 kV:
 - a) couplage en pont (figure 4-32);
 - b) barre omnibus unique (figure 4-29);
 - c) bloc transformateur-ligne de transport (figure 4-33).

On peut obtenir différents montages en combinant les dispositifs ci-dessus.

Figure 4-29
Barre omnibus (sans sectionneur)

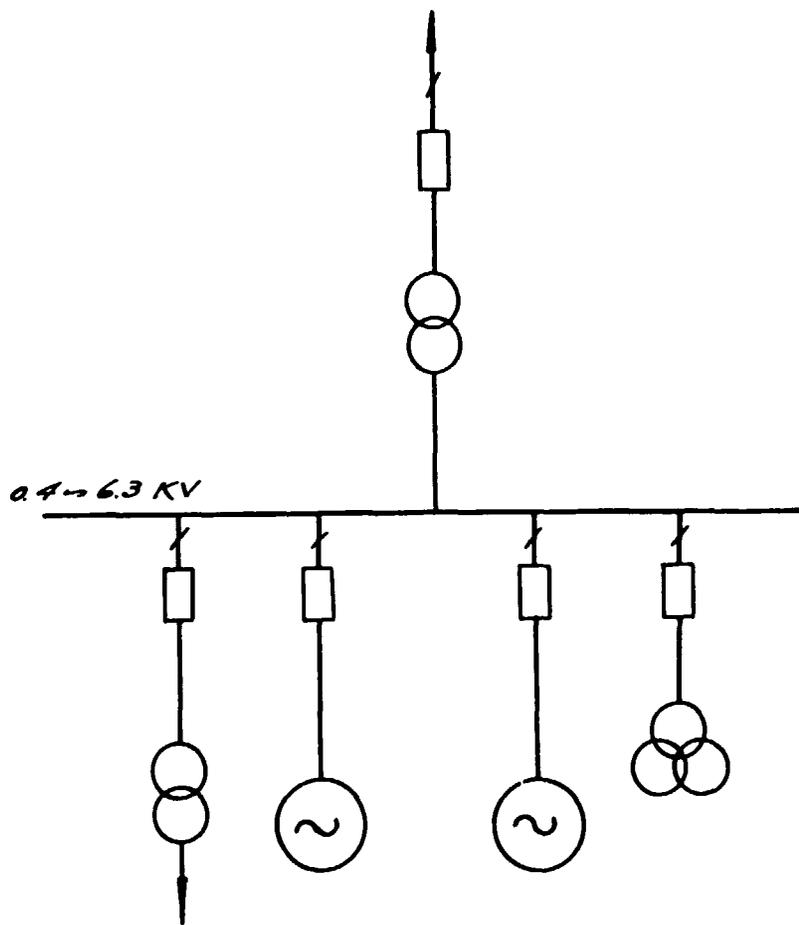


Figure 4-30
Barre omnibus 6,3 kV (à sectionneur)

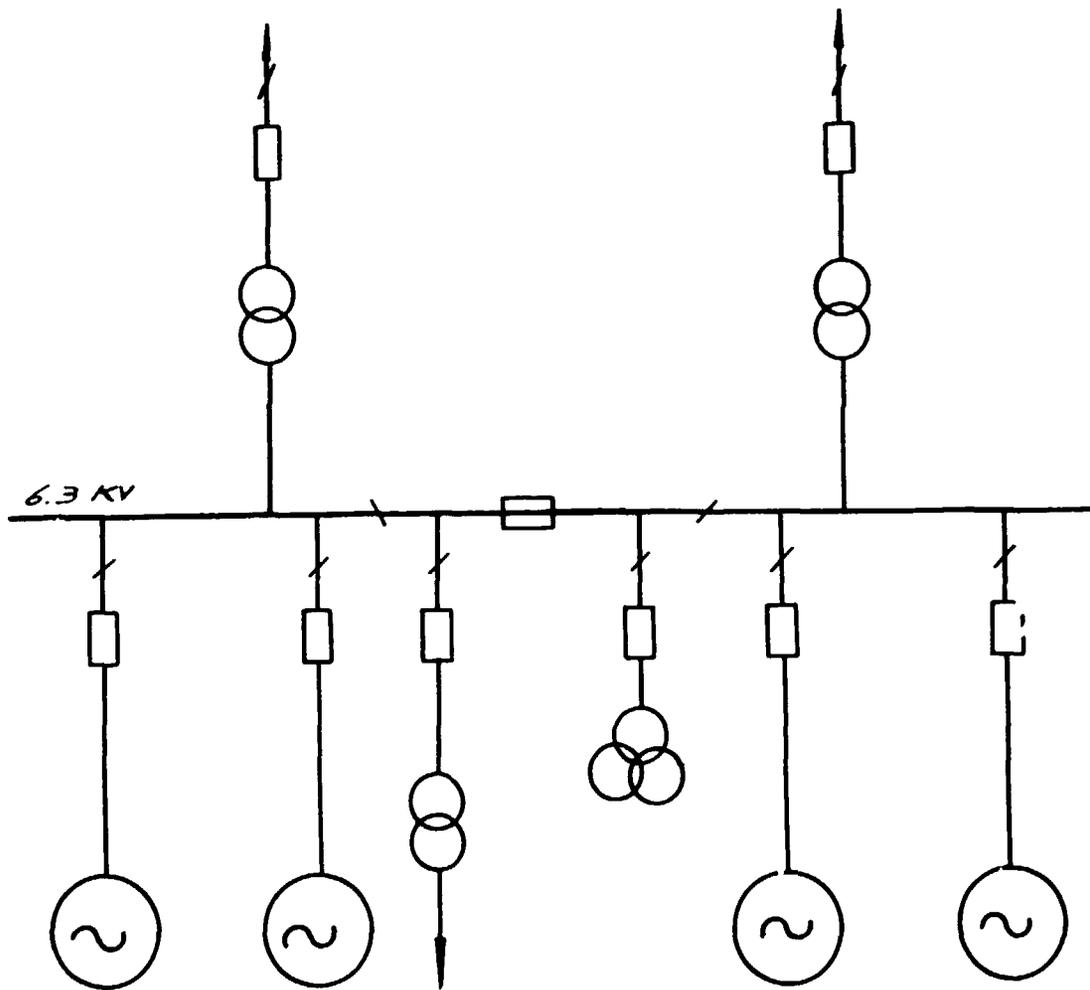


Figure 4-31
Bloc Generateur - Transformateur



Figure 4-32
Montage en „Font“

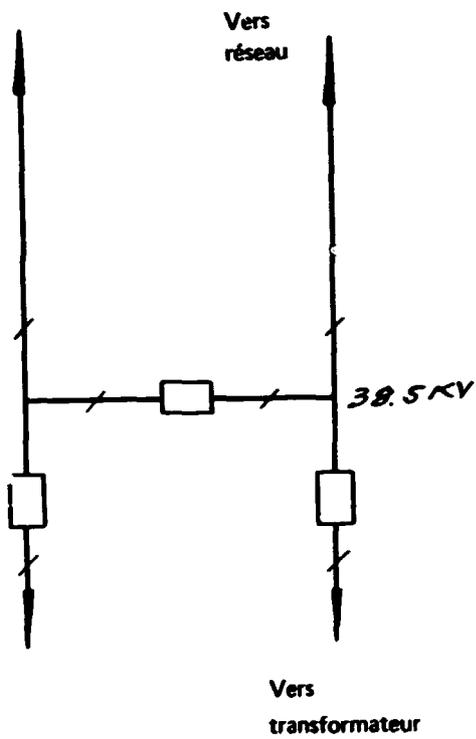
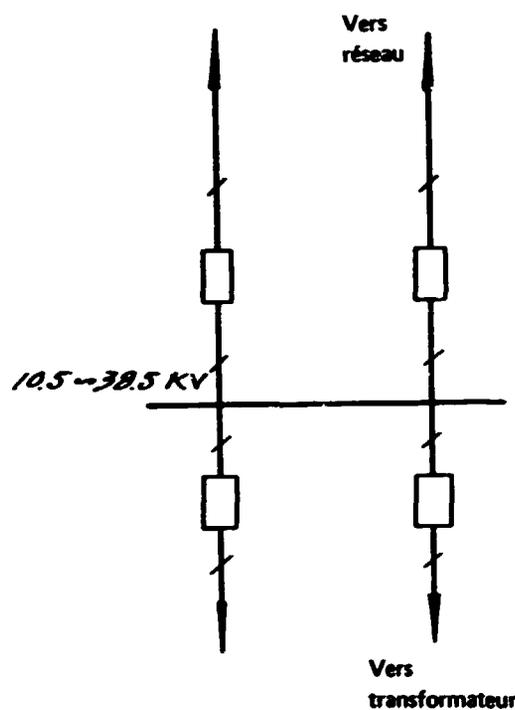


Figure 4-33
Barre omnibus 10,5 ~ 38,5 kV



Tout l'équipement haute tension nécessaire aux centrales peut être produit en Chine. Jusqu'à présent, sauf très rares exceptions, toutes les provinces et régions autonomes ont fabriqué leur propre matériel électrique.

Pour la plupart des installations de 6,3 kV, on utilise des ensembles de commutation complets, où sectionneurs, disjoncteurs, transformateurs, et même certains éléments des compteurs ou de protection et de fonctionnement dans les relais, sont assemblés selon divers montages combinés de câblage primaire et secondaire. Ils sont fournis complets aux clients. Il existe plusieurs dizaines de modèles de ces montages offerts au choix du personnel compétent des MCH.

Les modèles extérieurs servent généralement pour les installations à 38,5 kV. qu'on trouve d'ordinaire dans les transformateurs de plein air.

La protection par relais est analogue d'une MCH à l'autre. Elle englobe d'ordinaire différentiel, surintensité, surtension, surcharge, défaut à la terre, buchholz, etc. Jusqu'à présent, ces éléments ont été d'ordinaire du type électromagnétique. Des éléments transistorisés sont à l'essai dans quelques centrales.

Il existe aussi de nombreux modes de commande des MCH. Les plus courants sont:

1. la commande centralisée dans une salle unique (d'ordinaire dans les usines assez grandes);
2. la commande dans la salle même des générateurs par un tableau de bord avec manettes et commutateur;
3. le contrôle dans la salle même des générateurs au moyen d'ensembles complets de commutation.

Les deux derniers types servent d'ordinaire dans les petites centrales. On emploie du courant continu d'ordinaire à 220, 110 ou 48 V.

Les MCH ne sont guère automatisées en Chine. Dans celles d'une puissance située entre 500 et 12 000 kW, on trouve généralement en fonctionnement automatique:

1. le réglage de la fréquence et de la tension;
2. la commande centralisée d'enclenchement et d'arrêt des générateurs et de régulation de la charge;
3. la signalisation des défauts et dérèglements électriques et mécaniques;
4. la commande de certains dispositifs auxiliaires.

Les montages, câblages et éléments de ces dispositifs automatiques sont généralement encore du type électromagnétique. Des semi-conducteurs et circuits logiques sont à l'essai en certains endroits. On n'a pas encore tenté de télémécaniser les MCH.

Conformément à la fonction propre des MCH en Chine, leur automatisation se propose essentiellement d'assurer la qualité de l'électricité fournie, de rendre l'alimentation encore plus fiable, d'améliorer la sécurité, de réduire l'intensité du travail et de diminuer judicieusement l'effectif du personnel d'exploitation.

Actuellement, la plupart des centrales rattachées aux différents réseaux sont dotées de moyens de communication avec le centre distributeur. Beaucoup de celles qui disposent d'une ligne à 35 kW ont adopté le téléphone à courant porteur.

5. MACHINES HYDRO-ELECTRIQUES ET LEUR MATERIEL

I. ENSEMBLES TURBINE HYDRAULIQUE-GENERATEUR

Les fabricants chinois fournissent maintenant les petites machines hydro-électriques et leur équipement au complet. La Chine dispose de matériel non seulement pour les centrales de haute chute jusqu'à 612 mètres, propres à la mise en valeur des régions montagneuses, mais aussi pour les centrales de plaine, à gros débit et basse chute jusqu'à deux mètres. Il existe maintenant des modèles normalisés.

Suivant la réglementation nouvelle, les turbines hydrauliques se répartissent en trois catégories, qui comprennent 27 séries et 85 modèles différents. Elles sont soit à écoulement axial, soit à écoulement mixte, soit à action (voir tableau 5-1). Les supports de générateurs comprennent 16 séries et 121 types (voir tableau 5-2). Pour utiliser pleinement une énergie hydraulique très dispersée et pour électrifier les régions éloignées et montagneuses, les fabricants sortent une série spéciale de mini-ensembles allant de 0,25 à 75 kW. D'un faible volume, légers, simples à construire et peu coûteux, ils sont très appréciés et bienvenus des populations montagnardes.

La Chine produisant une grande variété de petites machines hydro-électriques, il est commode aux consommateurs de choisir le matériel qui leur convient le mieux.

Du fait du manque de puissance réactive sur le réseau rural, les MCH utilisent surtout des générateurs synchrones.

En Chine, où les paramètres hydrologiques sont si divers, il importe de normaliser, de populariser et de sérialiser les modèles. De tels modèles sont de fabrication simple, propres à la production en série, de forte productivité, de bonne qualité, peu coûteux et faciles à utiliser et à entretenir.

Jusqu'à présent, la Chine a produit plus de 200 000 jeux d'appareillages hydro-électriques. Une partie a été exportée et le reste a été installé dans plus de 80 000 petites centrales réparties sur de vastes étendues. Certains sont en service depuis plus de vingt ans. De leur fonctionnement, il ressort qu'ils sont de bonne qualité et qu'ils s'adaptent très bien à des conditions d'exploitation différentes selon les endroits. Par exemple, deux turbines à action, modèle CD10-WJ-90/1, de 500 kW sous une chute de 612 mètres, sorties des ateliers de matériel hydro-électrique de Chongqing, fonctionnent de façon satisfaisante depuis plus de dix ans à la centrale hydro-électrique de Zhong Shan, arrondissement de Dayong, province de Hunan. La cavitation est satisfaisante. La turbine hydraulique Jinghua n° 1 a prouvé sa qualité par des utilisations et comparaisons répétées et figure maintenant parmi les modèles officiellement normalisés (ZD 760). Récemment, la Manufacture de Jinghua a produit à titre d'essai le modèle GZN 005-WP-250, groupe turbo-générateur à courant réversible, déjà installé à l'usine marémotrice de l'arrondissement de Wenling, province de Zhejiang. Ces dernières années, de nombreux fabricants de province ont produit un grand nombre de matériel pour les petites centrales hydro-électriques.

Sous la conduite du ministère de la protection des eaux, les fabricants, comptant davantage sur eux-mêmes, ont beaucoup contribué à l'installation des petites centrales. Par exemple, la Société de constructions mécaniques du Bureau de l'énergie hydraulique, dans la province de Guangdong, a produit près de 1 100 groupes d'une puissance totale de 160 000 kW. Certains sont déjà installés au Tibet et dans l'île de Haïnan. Ce matériel a supporté les essais les plus sévères.

L'examen des petites machines hydro-électriques et de leur matériel après de longues périodes de fonctionnement a révélé que la fabrication chinoise est de construction simple mais convenable et de bonne qualité. Le tableau 5-3 énumère nombre de centrales en exploitation depuis de nombreuses années et qui fonctionnent toujours de façon satisfaisante.

Ces dernières années, la production en Chine des petites machines hydro-électriques et de leur matériel s'est développée très rapidement. La puissance de cette production dépasse maintenant le million de kW. Outre un matériel de base, un jeu complet d'équipement peut être fourni sur demande. Bien que surtout destinée au marché intérieur, une partie va à l'étranger.

Tableau 5-1
Numéros de série des divers types de turbines hydrauliques

N°	Type	Chute (m)	Caractéristiques de fonctionnement Débit (m ³ /S)	Puissance (kW)
1	ZD760-LM-40,60,80,100,120	3,5 - 7	0,45 - 6,8	12 - 400
2	ZD760-LMY-100,120	2,7 - 7	2,96 - 8,5	55 - 400
3	ZD560-LMY-40,60,80	4 - 14	0,568 - 3,45	12 - 400
4	HL260-WJ 25,30,35,42,50	9 - 29,7	0,235 - 2,45	12 - 500
5	HL220-WJ-42	24 - 50	0,95 - 1,375	200 - 500
6	HL110-WJ-30,35,42,50,60	20 - 70	0,159 - 1,07	20 - 600
7	CJ22-W-45/1 x 4,5; 55/1 x 7; 55/1 x 5,5; 70/1 x 9	50 - 330	0,055 - 0,401	20 - 630
8	XJ13-W-25/1 x 7; 32/1 x 7; 32/1 x 9; 40/1 x 9; 40/1 x 11; 50/1 x 12	36 - 160	0,034 - 0,66	21,5 - 826
9	XJ02-W-63/1 x 16	75 - 220	0,761 - 1,262	400 - 2.000
10	CJ22-W-110/1 x 12,5 110/2 x 12,5	220 - 340	0,781 - 0,970 1,446 - 1,942	1.250 - 2.500 2.000 - 5.000
11	CJ22-W-125/1 x 12,5	300 - 504	0,910 - 1,186	2.000 - 5.000
12	HL240-WJ-71	29,5	3,2	750
13	HL240-LH-120	18 - 23	7,23 - 9,13	1.000 - 2.000
14	HL240-LJ-120	20,1 - 37	8,06 - 10,85	1.250 - 3.200
15	HL240-LH-180	18,5 - 33,5	17 - 23,2	2.500 - 6.300
16	HL160-LJ-100	84 - 114	6,01 - 6,83	4.000 - 6.300
17	HL160-WJ-71	71,8 - 112,6	2,81 - 3,54	1.600 - 3.200
18	HL200-LH-100	67 - 90	7,81 - 8,97	4.000 - 6.300
19	HL260-WJ-71	21,3 - 28,7	3,32 - 3,86	500 - 800
20	HL260-LH-100	19 - 25	5,7 - 6,6	800 - 1.250
21	HL220-WJ-50	30 - 70	1,48 - 2,3	400 - 1.000
22	HL220-WJ-71	32 - 78	3,14 - 4,33	800 - 2.000
23	HL220-WJ-84	30 - 55	4,33 - 5,91	1.000 - 2.500
24	HL110-WJ-60	100 - 145	1,4 - 1,52	1.000 - 1.600
25	HL110-WJ-100	120 - 200	4,1 - 5,6	4.000 - 6.000
26	HL100-WJ-71	222 - 315	1,58 - 2,4	3.200 - 6.000
27	ZD560-LM-180	9 - 16	15,8 - 23,02	1.000 - 2.500
28	ZD560-LM-250	10,6 - 15,5	31,4 - 44,00	2.500 - 5.000
29	ZD510-LH-180	6,5 - 14,5	13 - 18,8	600 - 2.000
30	GD103-WP-275	4,5 - 8	39,2 - 57,6	1.360 - 3.600

Remarques:

- HL - Modèle à réaction à écoulement mixte
- XL - Modèle tubulaire incliné
- ZD - Turbine hélice à pale fixe et écoulement axial
- XJ - Modèle à écoulement radial
- CJ - Turbine à action
- GD - Modèle tubulaire à pale fixe
- W - Arbre horizontal
- L - Arbre vertical
- J - Bâche spirale en métal
- H - Bâche spirale en béton
- P - Bulbe
- M - Veine ouverte
- Z - Modèle tubulaire

Exemple 1 - HL 100-WJ-35

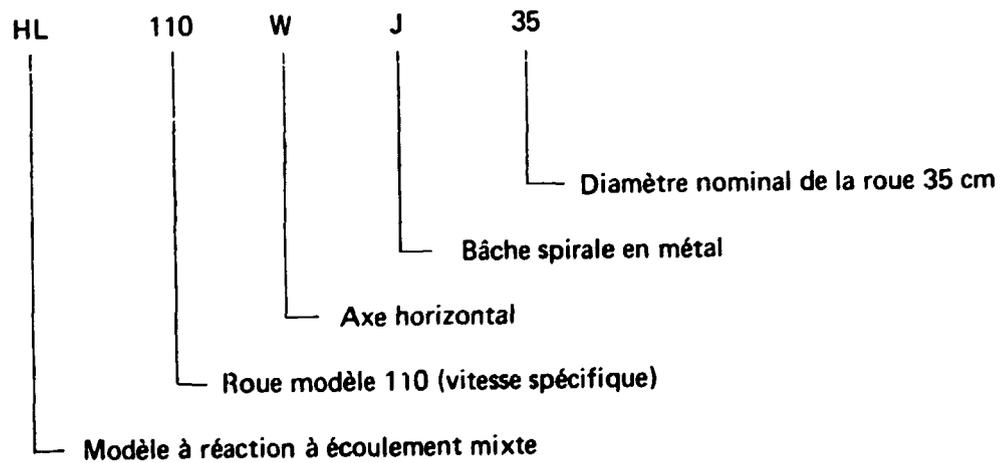


Tableau 5-2
Puissance des générateurs hydro-électriques

Vitesse (tpm)	1500	1000	750	600	500	428	375	300	250	214	187,5
Support n° \ Nombre de pôles	4	6	8	10	12	14	16	20	24	28	32
36,8	18 26	12 18									
42,3	40 55	26 40									
49,3		55 75	40 55								
59		100 125 160	75 100 125								
74		200 250	160 200	125 160							
85		320 400	250 320	200 250	160 200	125 160					
99		500 630 800 1.000	400 500	320 400	250 320	200 250	160 200	125 160			

118		1.000	630 800 1.000	400 750 800	320 500						
143		1.600	1.250	800 1.250	500 630 750 800						
145			1.250 1.600	1.000 1.250	630 1.000		320 500 630				
148	3.200 4.000 5.000 6.000	2.000 2.500 3.200									
173			1.600 2.000	1.600 2.000 2.500	1.250 2.000 1.600 2.500				350		
215			6.000	3.200 4.000 5.000	3.200 4.000	800 2.000	800 1.000 1.250		1.250 1.600	800	
260			6.300	5.000		3.200	2.500	1.250 1.600 2.000	1.000		
284											650
330									5.000 6.300	4.000	2.500 3.200

Table 3-3
Etat de marche de certains groupes turbines-générateurs de divers types

Centrale	Lieu	Puissance installée (groupes x kW) Chute (m)		Débit théorique (m ³ /S)	Turbine	Générateur	Fabricant	Années de service	Marche
Baizhongtan Deuxième tranche	Arrondissement de Tongcheng Province de Hubei	2 x 500	26 - 35	2,2	HL260-WJ-60	TSW-99/37-6	Ateliers de construction de turbines hydrauliques de Shaoguan	5	Régulière
Xianggongdong	Arrondissement de Dayong Province de Hunan	3 x 300	580	0,1	CD10-WJ-90/1	TSW-99/40-6	Ateliers de construction de turbines hydrauliques de Chongqing, province de Sichuan	13	Longtemps normale
Xiayuan	Arrondissement de Chunan Province de Zhejiang	2 x 500	126	0,484	CJ-W-90/1x11	TSW-143/32-12	Ateliers de construction de générateurs de Hangzhou, province de Zhejiang	13	Normale. Bon rendement. Entretien aisé
Pangj Deuxième tranche	Arrondissement de Jinyun Province de Zhejiang	2 x 800	220	0,5	CJ-W-90/1x11	TSW-143/43-10		6	
Mabu	Arrondissement de Longmen Province de Guangdong	2 x 3.000	122,7	3	HL160-WT-71	TSW-146/60-6	Société de constructions mécaniques du Bureau de l'énergie hydraulique, province de Guangdong	6	Bon rendement
Niuwan (rivière)	Guanyang	2 x 320	50	0,77	HL110-WJ-60	TSWN-85/39-8	Ateliers de constructions électriques de Kunming, province de Hunan	11	Normale
Landong	Rongchen	3 x 3.200	415	1	GJ-W-125/1x12	TSW-173/86-10	Ateliers de constructions électriques de Kunming, de Liuzhou, région autonome de Guangxi Zhuang	3 - 5	Normale
Guanpi	Province de Guangxi Yangsha Guangdong	6 x 800	184	0,6	GJ-W-82/1x11	TSW-143/41-10	Ateliers de construction de turbines hydrauliques de Shaoguan, province de Guangdong	15 Installation par tranches	Normale
Mayang Deuxième tranche	Arrondissement de Wujia Province de Zhejiang	2 x 1.600	25,7	0,79	HL260-WJ-35	TSWN-59/41-6	Ateliers de constructions électriques et mécaniques de Linhai, province de Zhejiang	8	Normale. Haut rendement
Baizhangji Première tranche	Arrondissement de Wenheng Province de Zhejiang	2 x 12.500	336 - 354	4,7	CJ-W-146/2-140	TSW-256/115-2	Ateliers de construction de turbines hydrauliques de Chongqing, province de Sichuan	20	Bon rendement. Toujours en service
Jiuguan	Arrondissement de Pucheng Province de Fujian	4 x 800	13	8,19	ZD560-LH-120	TSN-215/21-14	Ateliers de constructions électriques de Nanping, province de Fujian	5	Normale
Majilong	Arrondissement de Jinghua Province de Zhejiang	1 x 75	6	1,5	ZD760-LM-60	TSN-59/27-8	Ateliers de construction de turbines hydrauliques de Jinghua, province de Zhejiang	19	Normale
Feishuiyan	Arrondissement de Huang Province de Zhejiang	2 x 160	78	0,44	XJ02-W-42/1x10	TSWN-74/29-8	Ateliers de constructions mécaniques de Leqing, province de Zhejiang	6	Normale
Dongguan Deuxième tranche	Arrondissement de Yongchun Province de Fujian	2 x 1.250	43	3,5	HL220-WJ-71	TSWN-143/61-10	Ateliers de construction de turbines hydrauliques de Yongchun, province de Fujian	10	Normale

II. MATERIELS AUXILIAIRES PRINCIPAUX

En Chine, les constructeurs de machines hydro-électriques sont chargés de fournir les principaux matériels auxiliaires, notamment régulateurs, dispositifs d'excitation et éléments automatiques, outre les ensembles générateurs.

Selon leur mode de fonctionnement, on distingue cinq types de régulateurs utilisés dans les MCH: à main, électriques, hydrauliques-électriques, électroniques-électriques et électroniques-hydrauliques. Huit modèles figurent dans la liste officielle normalisée.

Tableau 5-4
Modèles de régulateurs

Modèle	Puissance (kg-m)	Type
TT-35	35	Monoréglage, écoulement direct
TT-75	75	Monoréglage écoulement direct
TT-150	100 - 220	Monoréglage écoulement direct
TT-300	230 - 375	Monoréglage écoulement direct
YT-300	230 - 375	Monoréglage, hydraulique-électrique
TT-600	450 - 760	Monoréglage, hydraulique-électrique
YT-1000	760 - 1.220	Monoréglage, hydraulique-électrique
CT-40	2.000 - 3.720	Monoréglage, hydraulique-électrique

Le régulateur de la série YT est un régulateur automatique conçu en Chine qui convient particulièrement aux MCH. Il est doté d'un pendule mobile et de deux servomoteurs qui, automatiquement, télécommandent la vitesse des turbines ainsi que leur mise en route et leur arrêt, de même qu'ils régularisent la charge. De plus, une vanne électromagnétique assure les arrêts d'urgence. Elle peut fonctionner en courant continu et fermer le conduit hydraulique pour arrêter promptement le générateur et prévenir ainsi un emballement en cas d'urgence quand le courant alternatif fait défaut. Si le système hydraulique tombe en panne, le régulateur peut être manœuvré à la main par un volant ou une tringle de levage. Le remplissage en liquide et en

air du réservoir de pression peut s'opérer automatiquement sans le secours d'un compresseur d'air, nécessaire pour les régulateurs ordinaires. Ces caractéristiques conviennent particulièrement bien aux minicentrales hydrauliques qui sont souvent dotées d'installations simples.

Ce modèle est surtout élaboré et fabriqué à Tianjin par la manufacture d'appareils de commande pour les machines hydro-électriques. Bien d'autres manufactures sont maintenant en mesure de fabriquer ce régulateur.

Les modes d'excitation sont nombreux. Par le passé, on utilisait surtout des excitateurs à courant continu et régulateur électromagnétique. Pour les générateurs de moins de 100 kW, on se borne à monter une résistance dans le champ magnétique pour commander l'excitation.

Depuis peu, de nombreuses manufactures fabriquent maintes sortes de dispositifs d'excitation modernes. Sont particulièrement au point: une excitation par thyristor avec transformateur monté aux bornes de sortie du générateur pour source de puissance; et une excitation compound à déphasage tripolaire et redresseur au silicium, à générateur double enroulement shunté par une bobine de réactance. Ces modèles ont été examinés en différents endroits selon divers modes d'utilisation de longue durée et ont prouvé leur fiabilité et leur avance technique. Ils ont donc été largement distribués dans le pays.

En certains points, des centrales anciennes ont été rénovées grâce à des dispositifs électroniques nouveaux, comme par exemple dans l'arrondissement de Laoding, province de Guangdong, où 70 pour cent des générateurs sont montés ou ont été remontés avec une excitation par thyristor.

Depuis 1970, des hydro-générateurs de 630 à 1 250 kW à excitation par thyristor sur le troisième harmonique de la tension ont été produits avec succès à titre d'essai et montés dans plusieurs centrales des provinces de Jiangxi, Gansu et Fujian. Plusieurs années d'utilisation ont prouvé la fiabilité de ce matériel qui, comparé à l'excitation électromagnétique de générateurs de même taille, économise non seulement 50 pour cent du coût et 50 pour cent du cuivre, mais assure aussi une auto-excitation meilleure, qui dépend très peu des variations de fréquence.

En outre, des dispositifs d'excitation sans balai, courants à l'étranger, ont été aussi fabriqués à titre d'essai et montés dans certaines centrales des provinces de Sichuan, Zhejiang et Hunan.

L'institut d'études de l'électro-commande, à Tianjin, prépare actuellement un modèle de série à excitation par thyristor pour des générateurs d'une puissance allant de 500 à 5 000 kW.

III. LIVRAISON D'EQUIPEMENTS COMPLETS

Pour la commodité des clients, l'Etat et certaines provinces ont organisé la livraison d'ensembles complets d'équipements électro-mécaniques pour les MCH. Ces ensembles comprennent les machines et leur matériel auxiliaire, transformateurs, commutateurs haute tension, tableaux de commande et de protection, câbles, grues, compresseurs, pompes, isolateurs, etc. Dans la province de Sichuan, une société de construction d'équipements pour les centrales

hydro-électriques a été créée pour réunir quelque 90 fabricants en vertu du principe de la coordination des spécialités. De telles sociétés sont aussi en voie de création dans les provinces de Zhejiang et de Guangdong.

6. RECHERCHE, DEVELOPPEMENT, FORMATION, REDUCTION DES COUTS

La Chine a formé en cours d'emploi de nombreuses équipes techniques à la réalisation et à la direction des MCH, dans des domaines tels que l'établissement des plans, la prospection, la conception, la construction, l'installation, l'exploitation et l'entretien. Présentement, on s'efforce d'élever le niveau technique, de poursuivre les recherches et les innovations techniques, d'améliorer la fiabilité de l'alimentation et de réduire les coûts de construction. Les principaux points techniques sont exposés ci-après.

I. RECHERCHE

A) Utilisation de tuyaux en béton précontraint

1. Avantages des tuyaux en béton précontraint (BPC)

Par le passé, les tuyaux servant dans les MCH pour les pressions fortes ou moyennes étaient d'ordinaire en acier. L'approvisionnement en acier, toutefois, ne suffisait pas à satisfaire les besoins résultant du développement pris par la construction des centrales. En 1964, utilisant l'expérience acquise à l'étranger, la MCH de Gao-liang, arrondissement de De-qing, préfecture de Zhao-qing, province de Guangdong, remplaçait avec succès ses tuyaux d'acier par des tuyaux en BPC avec assemblage à emboîtement de sa fabrication. Peu après, graduellement, toutes les centrales ont commencé à faire de même.

Depuis, chaque arrondissement de cette préfecture dirige une cimenterie qui fabrique des tuyaux en béton. Elles ont livré 76 kilomètres de tuyaux à 2 700 centrales. Parmi celles-ci, c'est à Huang-tongjiang, dans l'arrondissement de De-qing, que la chute est la plus haute (218 mètres). Trois groupes générateurs de 800 kW ont été installés ainsi que des tuyaux de 600 mm de diamètre (figure 6-1). A la MCH de Shui-xia, arrondissement de Huai-ji, où la chute est de 168 mètres, quatre groupes générateurs de 3 000 kW ont été installés ainsi que des tuyaux de 1 250 à 1 300 mm de diamètre (figure 6-2).

Figure 6-1
MCH de Huangtongjiang



Figure 6-2
MCH de Shiuxia



Les tuyaux en BPC ont sur ceux en acier les avantages suivants:

a) Moindre coût et moindre consommation d'acier

Généralement, on peut réduire la consommation d'acier de 70 à 90 pour cent et le coût de 60 pour cent, en utilisant des tuyaux en BPC au lieu de tuyaux en acier dans les conduites forcées (double économie encore plus forte dans les conduites de basse chute à grand diamètre). Par exemple, à la MCH de Shuixia, la conduite forcée en acier aurait exigé 175 tonnes de ce métal coûtant 310 000 yuan, alors qu'en BPC, elle n'a demandé que 53 tonnes d'acier coûtant 120 000 yuan. Les économies d'acier et d'espèces sont donc respectivement de 70 et 61 pour cent.

Tous les tuyaux en BPC ont subi des essais de pression hydraulique. Après maintien sous pression constante pendant 24 heures, on a constaté que, jusqu'à 34 kilos par cm^2 , la charge d'eau n'entraînait pas de risque de fissure ni de fuite. En service maintenant depuis quatre ans, ces tuyaux sont toujours en bon état.

b) Durabilité

Les premiers tuyaux en BPC ont été mis en service en 1964, soit voilà 15 ans. Ils fonctionnent toujours aussi bien qu'à cette date. Une autre MCH, installée dans les faubourgs de Zhao-qing, a une chute utile de 120 mètres. Une conduite forcée en acier, d'un diamètre de 0,4 mètres, a été montée en 1958. Erodée, impossible à entretenir à cause de son faible diamètre, elle s'est rompue sous la pression de l'eau. On l'a remplacée par une conduite en BPC. Celle-ci a fonctionné sans ennuis depuis son installation en 1968 jusqu'à aujourd'hui.

c) Commodité d'installation et meilleure étanchéité des joints

L'assemblage à emboîtement est facile à monter. L'important est de placer un anneau en caoutchouc sur la prise mâle avant de l'emboîter. Ce procédé donne une bonne étanchéité et assure un bon fonctionnement de l'installation. Par exemple, dans une MCH où la chute est de 200 mètres, en service depuis plus de quatre ans, l'anneau du joint est toujours en parfait état. Un tel joint peut aussi mieux s'adapter aux déformations.

d) Faible coût d'entretien

Néanmoins, les tuyaux en BPC ont des inconvénients: ils sont lourds et cassent plus facilement pendant le transport et l'installation. Ces difficultés devraient être résolues par des mesures appropriées.

2. Modèle de tuyaux en BPC

Ces tuyaux comprennent un noyau en béton sur une armature de tiges d'acier précontraint, un fil enroulé extérieurement autour du noyau et une couche de protection.

a) Critères

- 1) bonne résistance et absence de fuites;
- 2) rigidité longitudinale suffisante pour empêcher les fissures et le bris pendant la précontrainte, le décoffrage, le transport et l'installation;
- 3) le tuyau doit supporter l'effort de compression suivant:

Diamètre intérieur

$$DI = \leq 50 \text{ CM}, \quad \sigma_c 3 - 8 \text{ kg/cm}^2$$

$$DI = 60 - 80 \text{ CM}, \quad \sigma_c 3 - 6 \text{ kg/cm}^2$$

$$DI = 100 - 130 \text{ CM}, \quad \sigma_c 2 - 3 \text{ kg/cm}^2$$

L'expérience enseigne que, pour un diamètre inférieur à 30 CM, l'épaisseur doit être de 2 à 3 CM et la longueur de 2 à 3 mètres. Pour un diamètre de 30 à 130 CM, l'épaisseur sera de 4 à 8 CM et la longueur de 3,2 à 4,2 mètres.

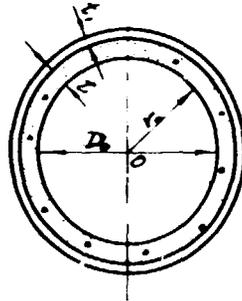
b) Calcul

La résistance dépend surtout de la technique et de la façon lors de la fabrication. D'ordinaire, les calculs techniques ne servent que de référence pour choisir l'armature en acier. La résistance effective du tuyau se mesure par l'essai de pression hydraulique. Les données suivantes servent au calcul (voir figure 6-3):

DI	désigne le diamètre intérieur r du tuyau en CM
ri	désigne le rayon intérieur du tuyau en CM
t	désigne l'épaisseur du tuyau en CM
L	désigne la longueur du tuyau en m
t ₁	désigne l'épaisseur de la couche extérieure de protection en CM
H	désigne la hauteur théorique de la chute en m
P	désigne l'équivalent de la pression intérieure en kg/cm ²
R _g	désigne la limite élastique de la tige d'acier précontraint. Pour une tige d'acier étiré pauvre en carbone \hat{A}_3F , cette limite est de 7 000 à 8 000 kg/cm ²

- R_a désigne la résistance du béton à la compression
 R_L désigne la résistance du béton à l'extension

Figure 6-3
Dimensions du tuyau en BPC



Sur 1 mètre de tuyau, la force de traction qui s'exerce circulairement sur la paroi est de:

$$N = 100 \text{ rip (kg)} \quad 36)$$

La surface de l'armature d'acier est de:

$$A_g = \frac{kN}{R_g} \text{ (CM}^2\text{)} \quad 37)$$

où k désigne le coefficient de sécurité, qu'on peut fixer à 2. La formule suivante servira aux calculs en vue de prévenir les fissures:

$$K_f N < [A_h (R_l + \mu \epsilon_0) + 200 A_g] \quad 38)$$

- où A_h désigne la coupe en long de la paroi pour 1 m \times 100 t (cM²)
 ϵ_0 désigne la tension de précontrainte effective (kg/CM²)
 k_f désigne le coefficient de sécurité applicable.

$$\text{Pourcentage d'acier } \mu = \frac{A_g}{t} \frac{1}{100}$$

Porter les valeurs de μ , N et A_g dans l'inégalité (38) pour obtenir σ_0 .

La perte à la précontrainte sera de σ_5 et la précontrainte totale sera de $\sigma_K = (\sigma_0 + \sigma_5) \leq 0,8 R_g$. Il est impératif de respecter cette condition là où le coefficient de résistance limite est de 0,8.

Normalement, quand μ n'est pas aussi élevé, la perte totale à la précontrainte se situe entre 1 000 et 2 000 kg/CM^2 ; pour les ouvrages précontraints par traction préalable, on prendra pour σ_5 une valeur supérieure à 1 000 kg/CM^2 .

3. Technique de fabrication et contrôle qualitatif

Pour satisfaire aux conditions théoriques d'un service optimal, les tuyaux en BPC doivent présenter une bonne résistance à la perméabilité et aux fissures et être suffisamment durables. Ces deux qualités dépendent du contrôle qualitatif appliqué pendant leur fabrication. La résistance à la perméabilité dépend non seulement de la qualité des matériaux et des proportions du mélange, mais aussi de la technique de moulage. L'application et le contrôle d'une précontrainte longitudinale et circulaire sur le tuyau, ainsi que la résistance de son noyau en béton, sont deux facteurs dont dépend leur résistance aux fissures. La rouille du fil de cerclage réduit beaucoup la durabilité des tuyaux. Donc, le contrôle qualitatif et l'examen pratiqué au cours d'une fabrication à trois temps par le procédé centrifuge ont été instamment recommandés et adoptés partout en Chine.

a) Contrôle de la contrainte longitudinale

Cette contrainte s'opère par pré-étirage de l'armature longitudinale en acier. Celle-ci est temporairement fixée au moule avant moulage du noyau pour accroître le degré de précontrainte après moulage. L'étirage s'opère soit par électrothermie, soit par vérin, comme le montrent les figures 6-4 et 6-5. Le pré-étirage de l'armature se mesure à son élongation: l'acier est étiré jusqu'à l'élongation calculée par l'équation suivante:

$$\Delta l = \frac{\sigma_K + 300}{E_g} l \quad 39)$$

- où Δl désigne l'élongation de l'armature longitudinale (CM)
 σ_K désigne la tension appliquée à l'armature (kg/CM^2)
 E_g désigne le coefficient d'élasticité de l'acier (kg/CM^2)

- l désigne la distance entre les deux points d'ancrage aux extrémités de l'armature (CM)
- 300 mesure la perte causée par les irrégularités de l'acier et sa déformation plastique sous l'action de la chaleur et de la tension (kg/CM^2)

Figure 6-4a

Raccordement du fil électrique à l'armature d'acier

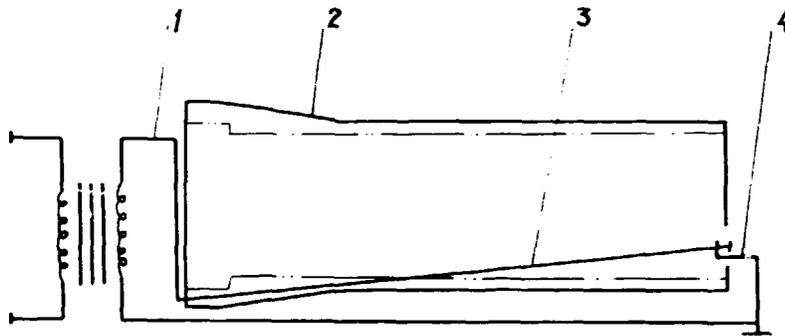


Figure 6-4a: Dessin montrant le raccordement à l'acier du câble venu du transformateur triphasé

- 1 branchement secondaire
- 2 moule
- 3 armature
- 4 semelle électrothermique

Figure 6-4b
Raccordement de la soudeuse à l'arc et de l'armature

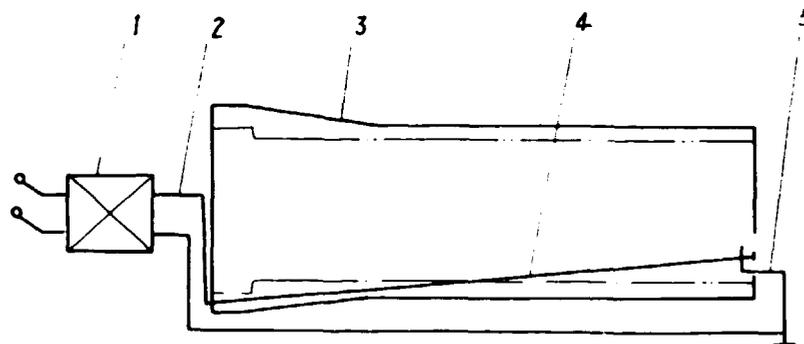
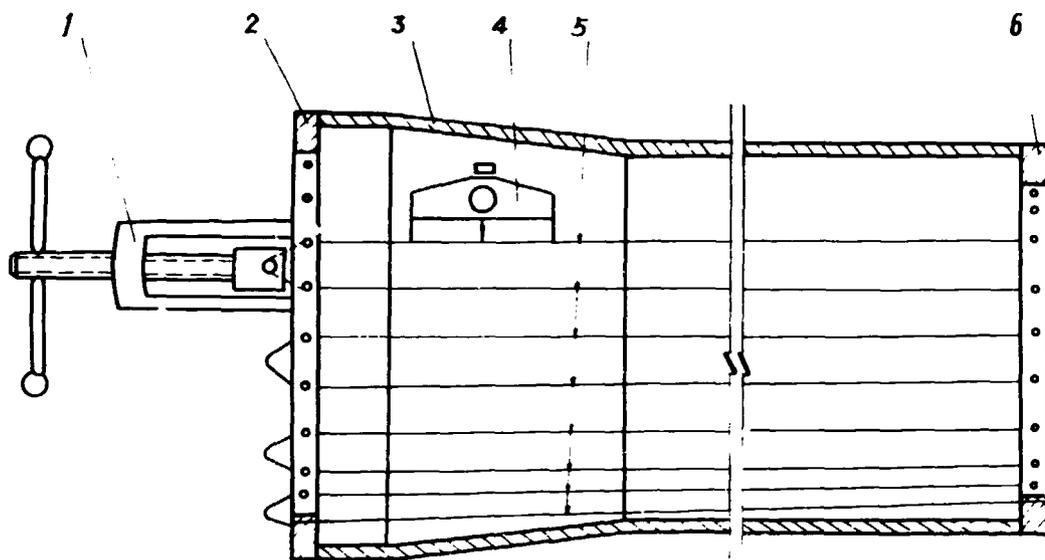


Figure 6-4b: Dessin montrant le raccordement de la soudeuse à l'arc et de l'armature

- 1 soudeuse à l'arc
- 2 branchement secondaire
- 3 moule
- 4 armature
- 5 semelle électrothermique

Figure 6—5
Elongation de l'armature au verin



Dessin montrant l'étirage de l'armature au verin

- 1 verin
- 2 attache du tirant
- 3 moule
- 4 tensomètre
- 5 armature
- 6 attache du tirant

Un tensomètre sert à mesurer l'allongement.

b) Contrôle qualitatif des matériaux

Les qualités exigées du sable et du gravier pour les tuyaux en BPC sont généralement les mêmes que pour un bon béton. Toutefois, il faut éliminer complètement les débris d'argile et de pierre contenus dans le sable pour que le béton soit suffisamment imperméable.

c) Contrôle des proportions du mélange

Pour le mélange, il faut déterminer les proportions par des essais et ne pas les changer arbitrairement sous peine de modifier l'imperméabilité du tuyau. Ce contrôle des proportions s'opère sur le facteur eau-ciment après le moulage par centrifugation. Ce facteur tombe alors à 66 – 68 pour cent de sa valeur avant moulage. En d'autres termes, les proportions à adopter pour le mélange sont proportionnelles à celles constatées après moulage. Il est donc interdit d'ajouter arbitrairement de l'eau.

d) Contrôle du procédé centrifuge en trois temps

Ces trois temps sont: centrifugation à petite, moyenne et grande vitesse. Le contrôle du procédé centrifuge s'opère par adaptation de la vitesse et de la durée de la rotation.

i) Contrôle de la rotation lente

La centrifugation commence par une rotation lente, pour faciliter le chargement des matériaux dans le moule et pour les faire adhérer plus uniformément à sa paroi. A cet effet, la force centrifuge produite par la rotation doit être supérieure à l'inertie du béton selon la formule

$$m \omega^2 r > mg \quad 40)$$

où	m	désigne la masse du béton (gm. sec/CM ²)
	ω	désigne la vitesse angulaire, soit $\frac{2\pi n}{60}$ (l/sec)
	r	désigne le rayon de rotation, c'est-à-dire le rayon extérieur du noyau (CM)
	g	désigne l'accélération terrestre, soit 981 cm/sec ²
	n	désigne la vitesse de rotation du moule (tpm).

Donc, cette vitesse est donnée par l'expression

$$n > \frac{300}{\sqrt{r}}$$

En pratique, on adopte en général de 1,5 à 1,6 fois cette vitesse théorique, selon la formule

$$(1,5 \sim 1,6) \times \frac{300}{\sqrt{r}} \quad 41)$$

La durée de la centrifugation lente dépend de la répartition uniforme des matériaux sur la paroi du moule. Plus longue pour ceux de grand diamètre, plus faible pour ceux de petit diamètre, elle est en général de 5 à 15 minutes.

Figure 6–6
Chargement du béton dans le moule



La figure 6–6 montre le pelletage du béton pour moulage par centrifugation.

ii) Rotation moyenne

Elle fait passer de la rotation lente à la rotation rapide. Sa vitesse doit croître graduellement. Le béton à mouler par centrifugation contient relativement peu d'eau: il n'est donc guère fluide. Accélérer brusquement la rotation entraînerait un déplacement du matériau, dont l'épaisseur serait alors inégale. De plus, une brusque accélération provoquerait un à-coup et accroîtrait la séparation des éléments. La commande de la vitesse intermédiaire consiste donc à passer graduellement de la petite à la grande vitesse. Le nombre de tours par minute et la durée de la rotation se déterminent par l'observation. En général, la durée ne dépasse pas 10 minutes (figure 6-6).

iii) Rotation rapide

Elle vient en dernier. C'est alors que le béton atteint sa densité maximale. Selon le calcul théorique, la pression centrifuge s'écrit:

$$F = \frac{\gamma h \pi^2 n^2}{2700 g} \left(r_2^2 \frac{r_0^3}{r} \right) \quad (42)$$

- où F désigne la pression centrifuge du béton sur le moule (kg/CM²)
γh désigne le poids spécifique du béton (kg/CM³)
n désigne la vitesse de rotation du moule (tpm)
r. et r désignent, respectivement les rayons intérieur et extérieur du tuyau (CM).

On sait par l'équation (42) que, pour des tuyaux de dimension constante, la pression centrifuge sera d'autant plus forte que la vitesse de rotation augmente. Donc, augmenter cette rotation fournit un bon moyen d'accroître la résistance et l'imperméabilité des tuyaux.

Pour la rotation rapide, une vitesse correspondant à une pression centrifuge de 0,8 à 1,0 kg/CM² est jugée la meilleure. Toutefois, elle est rarement atteinte car le moule, fait d'ordinaire à la main avec une plaque d'acier de 3 à 6 mm d'épaisseur, manque de rigidité. La pression centrifuge qu'il peut supporter ne dépasse pas toujours 0,5 kg/CM². Dans la pratique, quand on fabrique un tuyau en BPC d'un diamètre intérieur de 1 250 MM, il faut une pression centrifuge de 0,73 à 0,75 kg/CM² pour que la résistance à la perméabilité atteigne ou dépasse 34 kg/CM². On pourra alors l'employer sans risque dans une centrale de haute chute où la pression théorique de l'eau à l'intérieur du tuyau sera de 21,2 kg/CM². Donc, dans la rotation rapide, la vitesse dépendra du diamètre du tuyau et du degré requis de résistance à la perméabilité. En général, la pression centrifuge qui s'exerce sur le moule doit se situer entre 0,4 et 0,75 kg/CM². Ces deux grandeurs correspondent, respectivement, à une faible et une forte résistance à la perméabilité.

La durée de la rotation rapide se détermine par le degré de drainage, la densité du béton et parfois par l'essai de pression hydraulique.

iv) Contrôle des procédés de fabrication

Etant donné que la centrifugation sépare les matériaux, l'imperméabilité du noyau de béton dépendra surtout de la couche de mortier et de la couche de ciment. Ensemble, elles forment la couche imperméable. Son épaisseur n'est que du quart de celle du tuyau. Si on opère en chargeant et en centrifugeant le béton couche par couche de façon que sa paroi se forme de couches imperméables successives, sa résistance à la perméabilité augmente beaucoup. En général, l'opération de chargement et centrifugation peut être répétée de deux à quatre fois, selon l'épaisseur désirée et le diamètre du tuyau.

e) Contrôle de l'enroulement métallique

Un fil d'acier est enroulé autour de la paroi extérieure du noyau. Une enrouleuse à contre-poids sert le plus souvent à cet effet. Les figures 6-7 et 6-8 en montrent le principe. Le fil est soumis à une tension égale à la moitié de ce que pèse le contre-poids. Cette tension se règle au moyen du contre-poids et peut se calculer par l'équation suivante:

$$W = 2 \sigma_K f y \quad 43)$$

où W désigne le poids du contre-poids (kilos)

σ_K désigne la tension qui s'exerce sur le fil (kg/CM^2)

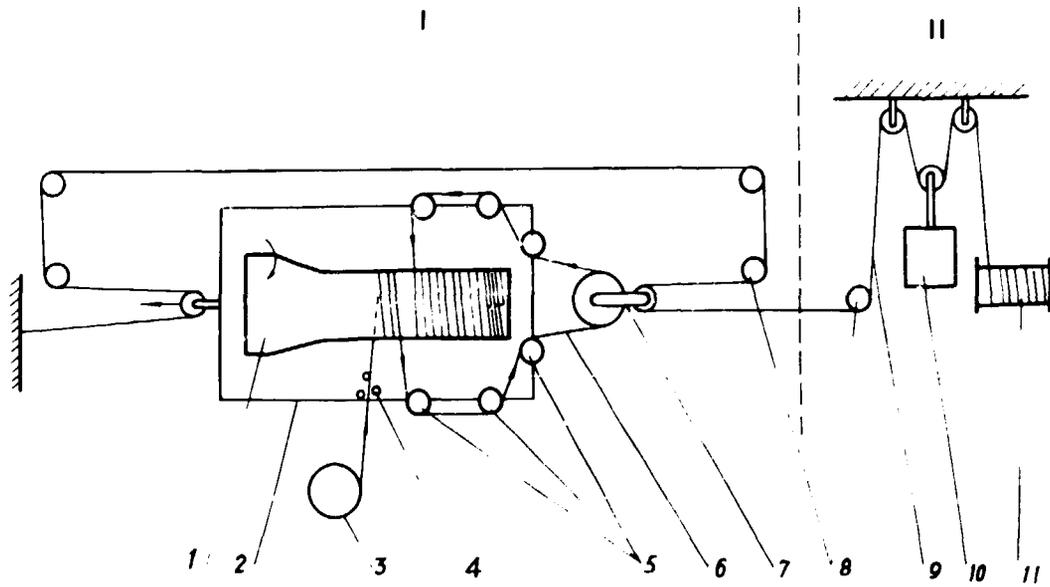
$f y$ désigne la section du fil (CM^2)

Le fil s'enroule autour du noyau en passant par les poulies de guidage montées sur le chevalet. Celui-ci avance à mesure que le tuyau tourne. Le pas des spires est réglé par l'avance du chevalet.

Figure 6-7
Enroulement métallique sur le noyau



Figure 6-8
Schéma de fonctionnement de l'enrouleuse



La figure 6-8 montre le principe de fonctionnement d'une enrouleuse à contrepoids.

Figure 6—8: Enroulement métallique autour du noyau

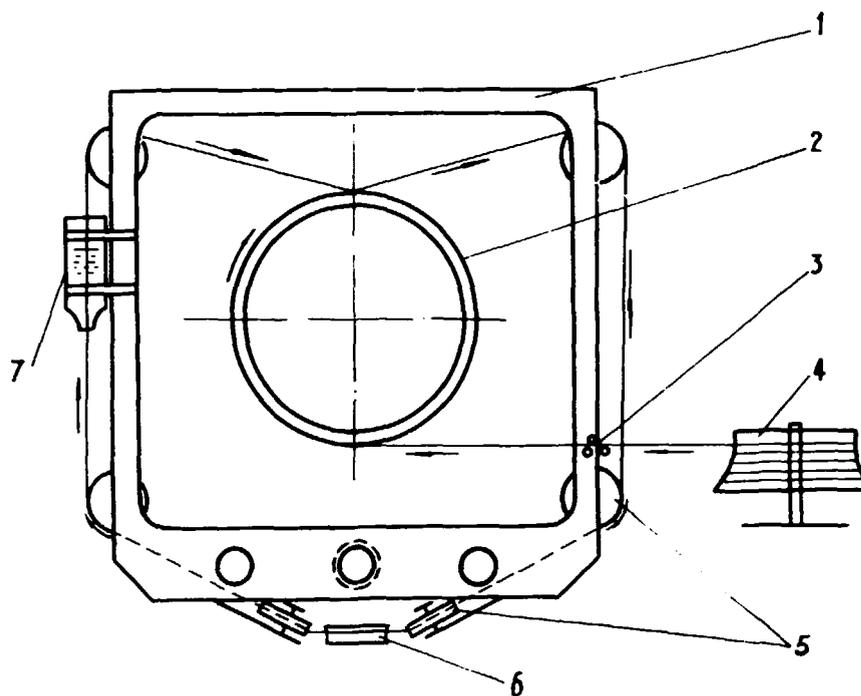
- I Enroulement
- II Contrepoids
- 1 noyau
- 2 chevalet
- 3 treuil
- 4 dispositif de fixation et de guidage du fil
- 5 poulie de guidage du fil étiré
- 6 fil étiré
- 7 dispositif tenseur
- 8 poulie du guidage du câble
- 9 câble
- 10 contrepoids
- 11 tambour

Si, après enroulement, des fêlures verticales apparaissent sur la paroi intérieure du noyau, on doit rechercher une éventuelle malfaçon et vérifier si l'étirage de l'armature a été suffisant pendant la fabrication et si le noyau a atteint pendant l'enroulement la résistance spécifiée. On doit alors prendre des mesures correctives. Les fêlures peuvent se boucher avec une colle époxyde.

f) Protection de l'enroulement

La durée utile d'un tuyau en BPC est assez longue, mais la rouille peut ronger le fil qui l'entoure et provoquer un défaut. En général, on lui applique, mécaniquement ou à la main, une couche de protection en mortier de ciment de 15 à 20 mm d'épaisseur. A présent, une autre méthode de protection consiste à appliquer une couche antirouille sur le fil. La façon la plus pratique est de fixer un bidon d'antirouille sur un des côtés du chevalet de l'enrouleuse, comme le montre la figure 6—7. En le traversant, le fil s'enrobe automatiquement d'une couche d'antirouille juste avant de s'enrouler sur le noyau. Ainsi, si le revêtement protecteur en mortier de ciment fait défaut, la couche d'antirouille demeure.

Figure 6-9
Schéma de l'installation pour traitement antirouille



La figure 6-9 représente l'application automatique d'antirouille sur le fil.

- 1 chevalet
- 2 noyau
- 3 dispositif de fixation et de guidage du fil
- 4 tambour
- 5 poulie de guidage du fil
- 6 dispositif tenseur
- 7 bidon d'antirouille

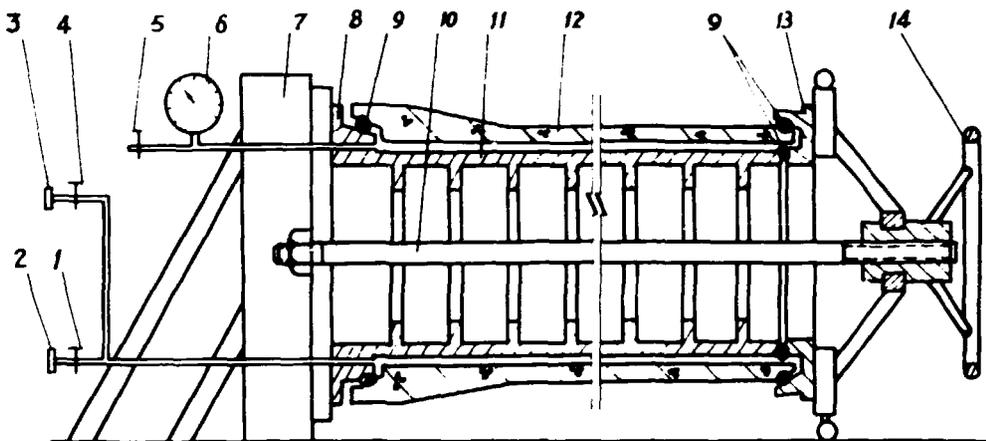
g) Essai de pression hydraulique

L'essai de pression hydraulique permet de déterminer la résistance à la perméabilité et aux fissures. On se sert généralement à cet effet de l'appareil ordinaire, rempli d'eau. Pour les tuyaux de grand diamètre qui subiront de fortes pressions, un appareil chemisé, comme celui que montre la figure 6-10, convient mieux. Il réduit beaucoup la poussée totale de l'eau contre les butées aux deux extrémités du tuyau, ce qui leur assure une meilleure étanchéité.

Etant donné que les tuyaux en BPC qu'utilisent les centrales hydro-électriques sont toujours posés en surface sur un versant et ne subissent donc ni la pression des terres, ni celle des charges mobiles que peut supporter le terrain, on adopte toujours, dans les essais hydrauliques, une pression égale à 1,3 fois la somme de la pression hydrostatique et du surcroît créé par le coup de bélier, soit 1,3 fois la pression hydraulique théorique à l'intérieur. Si, dans de telles conditions, on ne constate ni fuite ni fissure, les tuyaux peuvent être déclarés bons. Aucun ne doit être installé et utilisé sans essai préalable de résistance à la perméabilité et aux fissures.

Figure 6-10

Appareil d'essai de la pression hydraulique (schéma)



La figure 6-10 représente l'appareil chemisé servant à l'essai

- 1 Vanne d'admission de l'eau
- 2 Raccordement à la pompe électrique
- 3 Raccordement à la pompe à eau
- 4 vanne de remplissage
- 5 purge d'air
- 6 manomètre
- 7 bâti
- 8 butée fixe
- 9 joint d'étanchéité en caoutchouc
- 10 barre de tension
- 11 chemise d'acier
- 12 béton précontraint
- 13 butée mobile
- 14 volant

Plus de dix ans d'utilisation ont montré que les tuyaux en BPC résistent mieux aux fissures et à la perméabilité. Il est prouvé qu'on peut donc les utiliser sans risque dans des centrales hydro-électriques sous 200 mètres de chute. De tels tuyaux d'un diamètre inférieur à 1 300 mm peuvent être fabriqués avec une installation relativement simple sur place ou en usine.

B) Installation de vannes de sécurité dans les MCH

Si la charge d'une centrale hydro-électrique en marche tombe brusquement, le régulateur déclenche automatiquement la fermeture des aubes de guidage de la turbine, d'où augmentation β de sa vitesse et augmentation ξ de la pression dans la conduite. Ces deux augmentations peuvent s'exprimer en fonction de la principale variable T_s , c'est-à-dire temps de fermeture des aubes de guidage. Par les caractéristiques de la conduite et de la turbine, on sait que ξ varie en sens contraire de β dans un certain intervalle de variation de T_s . Ainsi, si T_s augmente, ξ diminue, tandis que β augmente et inversement. Dans une centrale à courte conduite (dont le temps de déclenchement T_w est normalement inférieur à 2,5 secondes), on obtient pour ξ et β des valeurs acceptables si l'on choisit bien T_s . En revanche, pour une centrale à longue conduite, il est souvent impossible de choisir une valeur convenable de T_s pour laquelle les maxima respectifs de ξ et de β se situent tous deux dans un intervalle acceptable. En pareil cas, on installe d'ordinaire une cheminée d'équilibre (ou réservoir d'équilibre) pour atténuer l'opposition entre ces maxima respectifs, ce qui stabilise le système de régulation. Ce dispositif diminue effectivement la longueur de la conduite et ramène la valeur de T_w dans des limites permmissibles. Toutefois, la construction d'une cheminée d'équilibre exige des matériaux, des dépenses et du temps. De plus, en certains lieux, les conditions topographiques et géologiques s'y prêtent mal.

Pour hâter la construction et en réduire le coût, on a donc imaginé de remplacer la cheminée d'équilibre par une vanne de sécurité utilisant une oléo commande intégrale d'un modèle nouveau. De l'essai d'une telle vanne à la centrale hydro-électrique de Jingganshan dans la province de Jiangxi ainsi que des essais industriels et de quatre années d'utilisation à la centrale de Longyuan province de Hunan, il ressort que de telles vannes du modèle TFW-400 à oléocommande intégrale remplacent avantageusement la cheminée d'équilibre.

Dans le cas considéré, la galerie et la conduite ont une longueur totale de 1 950 mètres, la chute est de 83 mètres et la puissance de chaque groupe de 1 600 kW.

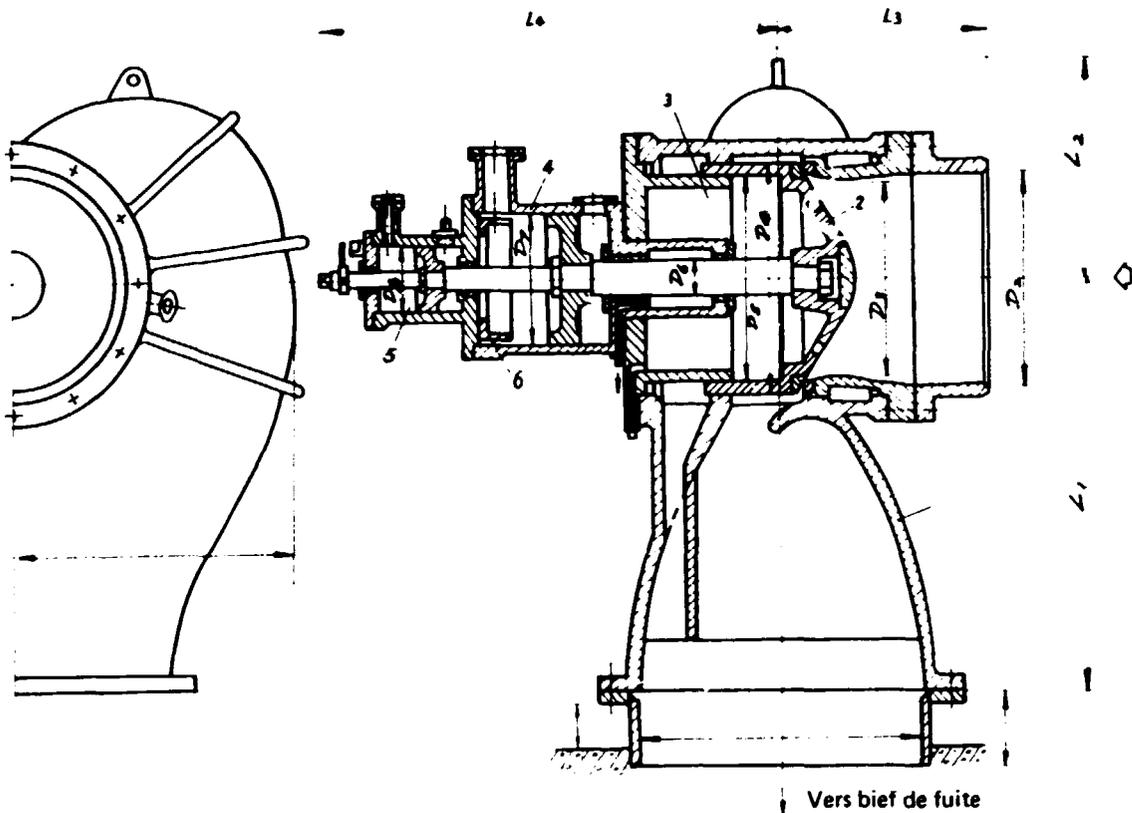
En cas de chute de la charge pour les trois groupes, l'augmentation ξ de pression dans la conduite est de 14,5 pour cent et l'augmentation β de vitesse de la turbine est de 24,4 pour cent. Sensiblement moindres que pour une cheminée d'équilibre ($\xi = 24$ pour cent, $\beta = 32$ pour cent), ces valeurs sont très proches de celles que donne la loi de fermeture optimale, soit $\xi = 11,2$ pour cent et $\beta = 25,5$ pour cent. La stabilité et la qualité du comportement en présence de transitoires assurées au système régulateur en cas de perturbation à vide et en charge répondent aussi aux conditions existant dans la centrale. On a pu réaliser une économie de 90 pour cent sur le coût d'une cheminée d'équilibre et, de surcroît, inaugurer avec un an d'avance.

1. La vanne de sécurité modèle TFW-400 à oléocommande intégrale

Une vanne de sécurité doit être sensible, sûre et fiable quand elle remplace la cheminée d'équilibre dans les centrales hydro-électriques. La plupart de celles utilisées par le passé étaient à commande mécanique. Les années d'usage ont montré qu'elles fonctionnent de façon irrégulière et avec un retard d'une demi-seconde sur les aubes de guidage. Donc, même avec une telle vanne, la pression augmente très fortement dans la conduite. Et, pour la protéger, des mesures spéciales de sécurité doivent être prises si la vanne fonctionne mal. Donc, celle-ci ne peut pas assurer complètement la réduction du coup de bélier. Divers modèles de vannes à commande hydraulique ont apporté quelque amélioration, mais les insuffisances persistaient. Par exemple, certaines fonctionnaient avec un retard de 0,1 à 0,4 seconde; d'autres exigeaient un plus grand volume d'huile; d'autres encore avaient un système de commande compliqué comprenant un grand nombre d'éléments difficiles à monter sur place, et ainsi de suite. Tous ces inconvénients ont disparu avec le modèle TFW-400. La vanne et son système de commande sont décrits séparément ci-après.

a) Détails de la vanne (voir figure 6-11)

Figure 6-11
Schéma de la vanne de sécurité



La vanne modèle TFW est un montage horizontal qui comprend le corps (1), le disque (2), la chambre d'équilibre (3), le servomoteur (4), le carter d'huile (5), avec prise d'eau, vidange, admission d'air, etc. Le servomoteur et le carter d'huile sont à l'intérieur même du corps, construction simple qui réduit les cotes d'encombrement.

Le corps en acier coulé forme deux tubulures en demi-spirale symétriques par rapport à l'axe vertical. A l'intérieur, un aubage fixe fait tourbillonner l'eau qui arrive, turbulente ce qui en dissipe l'énergie avant qu'elle s'écoule dans le bief de fuite. La vanne est dotée d'un dispositif d'admission d'air pour réduire la vibration en marche.

Le bouchon est conique ou rond. Il est en acier coulé, revêtu de chrome contre la rouille. Il est percé de plusieurs trous pour réduire la pression de fonctionnement.

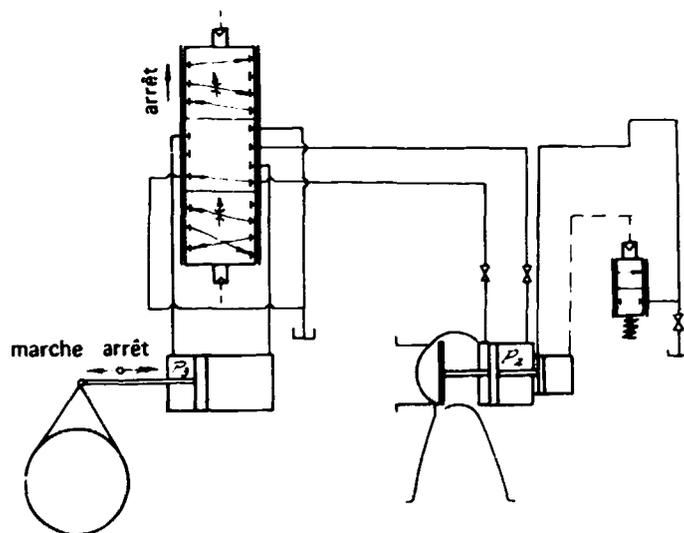
L'obturation est assurée par le contact entre l'anneau d'acier inoxydable monté sur le bouchon et l'anneau amovible en bronze phosphoreux sur le corps de la vanne. Leurs deux surfaces sont meulées et ajustées avec précision pour donner une excellente étanchéité.

b) Le système de commande

Ce système se caractérise par une oléocommande intégrale directe et complète et par un dispositif de fermeture en deux temps des aubes de guidage.

Figure 6-12

Schéma du système de commande



Il agit par la pression de l'huile comme suit:

- Quand la charge est constante, le piston du distributeur est à mi-course et l'huile sous pression s'écoule par un boisseau dans la chambre de fermeture de la vanne de sécurité, tandis que la chambre d'ouverture est en position de vidange. La pression de l'huile est plus forte dans la chambre de fermeture du servomoteur que la poussée de l'eau sur le disque. La vanne reste donc fermée.

- Quand la charge diminue un peu (jusqu'à 15 pour cent de la valeur nominale), le piston remonte légèrement, et une petite quantité d'huile sous pression pénètre dans la chambre de fermeture du servomoteur pour fermer lentement les aubes de guidage, tandis que la vanne de sécurité reste fermée.
- Quand la charge tombe momentanément (de plus de 15 pour cent de la valeur nominale), le piston remonte davantage, et la vanne de sécurité s'ouvre rapidement, tandis que les aubes de guidage se ferment. Les deux mouvements sont simultanés.
- Si la charge augmente, l'huile sous pression s'écoule directement dans la chambre d'ouverture du servomoteur. La vanne de sécurité reste fermée.
- «Fermeture graduée»: ce dispositif intervient en cas d'ouverture rapide de la vanne de sécurité. Celle-ci atteint vite la position déterminée par l'anneau limite, puis continue plus lentement, ce qui provoque la fermeture en deux temps des aubes de guidage. Le point intermédiaire de ce dispositif se règle aisément sur place.

Si la vanne de sécurité ne fonctionne pas, il faut fermer lentement les aubes de guidage pour que la pression dans la conduite ne dépasse pas les limites permises.

2. Stabilité et qualité du comportement en présence de transitoires

Dans l'emploi d'une vanne de sécurité, les problèmes suivants présentent une grande importance:

- calcul des valeurs maximales d'augmentation ξ de la pression dans la conduite et de l'augmentation β de la vitesse de la turbine en cas de chute de charge;
- calcul de la stabilité et de la qualité du comportement en présence de transitoires du système régulateur lors de petites perturbations.

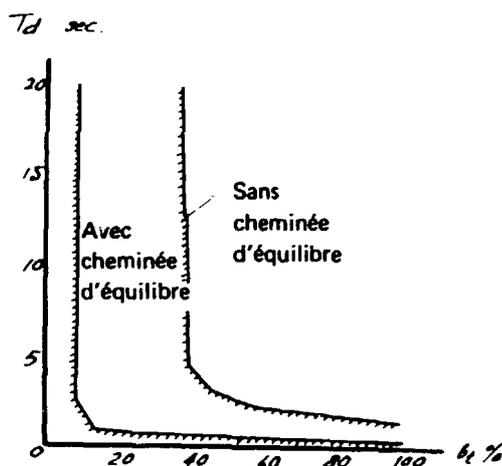
Pendant longtemps, ces deux calculs se sont faits séparément. Ainsi, en cas de chute de charge, on calculait par exemple l'augmentation maximale de pression dans la conduite par la formule d'Allievi et l'augmentation maximale de vitesse de la turbine par la formule S.M.S. Pour de petites perturbations de la charge, on calculait la stabilité et la qualité du comportement par une simplification faisant du système régulateur d'ordre supérieur un système tertiaire composé d'une turbine idéale d'un régulateur idéal et d'un coup de bélier dans une colonne rigide. Manifestement, cette méthode de calcul ne convient pas aux centrales hydro-électriques dotées d'une longue conduite et d'une vanne de sécurité.

La méthode actuelle traite la qualité du comportement du système régulateur par la théorie moderne de la commande et ne fait qu'un seul calcul pour toute perturbation forte ou faible. Elle tient compte de la non-linéarité des éléments de la turbine et de certains importants facteurs non linéaires du régulateur, tels que le coefficient de saturation du dispositif de mesure de fréquence, la course limite de l'amortisseur, ainsi que le point mort et la course limite du distributeur et du servomoteur. On obtient ainsi simultanément des résultats précis sur la stabilité ainsi que sur la qualité du comportement.

Le calcul figure dans le document intitulé «Application of relief valves in small hydro-electric stations», présenté au deuxième Séminaire sur le transfert des techniques relatives aux MCH, organisé en 1980 par l'ONUDI.

La figure 6-13 montre la stabilité d'un régulateur modèle XT-600 (à commande mécanique) obtenue respectivement avec une vanne de sécurité et une cheminée d'équilibre, en cas du fonctionnement séparé.

Figure 6-13
Comparaison des régions de stabilité du régulateur



La marche des groupes est régulière quand ils sont rattachés à un grand réseau, mais, si chaque groupe travaille isolément, la stabilité en cas de faible perturbation dépend surtout de l'action du régulateur: cette action doit être d'autant plus forte que la conduite est plus grande. Donc, pour choisir entre vanne de sécurité et cheminée d'équilibre, on doit considérer les exigences techniques que doit satisfaire le régulateur d'après les conditions effectives de fonctionnement de la centrale.

3. Production en série et utilisation

Les trois premiers jeux de vannes de sécurité modèle TFW-400 à oléocommande intégrale ont été mis en service avec succès au début de 1976 à la centrale de Longyuan, province de Hunan.

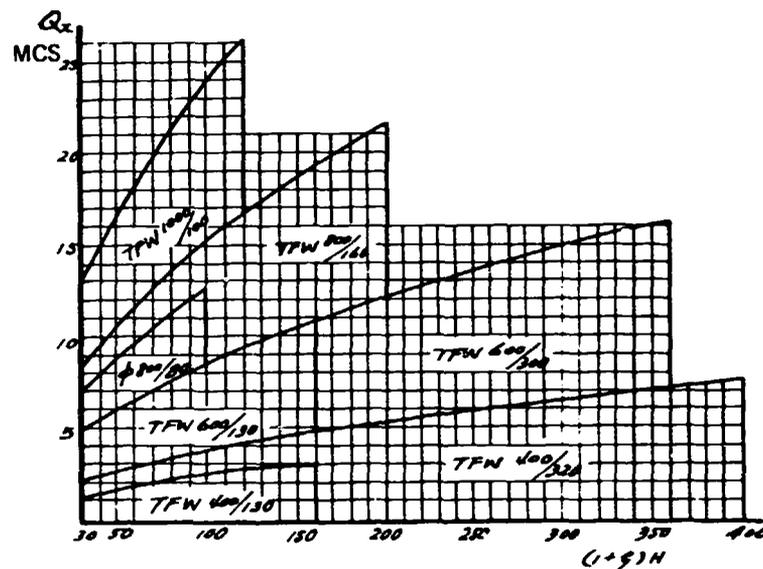
On prépare actuellement des modèles de série pour différents types de turbines. Sept modèles de quatre diamètres (400, 600, 800 et 1 000 mm) pour diverses hauteurs de chute ont été dessinés et fabriqués. Le tableau 6-1 en donne les principales caractéristiques.

Tableau 6-1
Principales caractéristiques des vannes de sécurité TFW

Modèle \ Caractéristiques	TFW 400/130	TFW 400/320	TFW 600/130	TFW 600/300	TFW 800/80	TFW 800/160	TFW 1000/100
Diamètre D_x (MM)	400	400	600	600	800	800	1.000
Course max. Y_x (mm)	80	100	150	150	200	200	250
Chute nominale H_p (m)	130	320	130	300	80	160	100
Chute max. $H_{max} = (1 + \xi) H_p$ (m)	160	400	160	360	100	200	120
Débit max. $m^3/sec.$ Q_x correspondant à H_{max}	3,15	7,67	10,9	16,4	12,8	21,7	26,3
Poids (tonnes)	1,2					5	8,5

La figure 6-14 montre le domaine d'utilisation de ces diverses vannes.

Figure 6-14
Domaine d'utilisation des diverses vannes de sécurité



Des centrales toujours plus nombreuses adoptent les vannes de sécurité au lieu de cheminées d'équilibre après leur succès à Longyuan. Jusqu'à présent, de telles vannes fonctionnent de façon satisfaisante dans plusieurs centrales, dont Jinggangshan (province de Jiangxi), Changtanhe (région autonome de Guangxi Zhuang) et Jixi (province de Fujien). A 17 autres ont été fournies 33 de ces vannes.

Leur adoption à la place de cheminées d'équilibre a permis une économie de plus de 5,4 millions de yuans. Ce chiffre ne comprend pas les centrales où les conditions topographiques et géologiques interdisaient de construire de telles cheminées. L'économie est difficile à évaluer exactement dans ces cas.

En conclusion:

- a) Les vannes de sécurité à oléocommande intégrale présentent les avantages suivants: sensibilité (action instantanée), sûreté et fiabilité, conception simple, ajustage et entretien commodes. Un enclencheur hydraulique est monté entre le servomoteur de la vanne et celui de la turbine pour assurer une exacte synchronisation sans risque de fonctionnement séparé. Pour mieux protéger la conduite et la turbine, le dispositif de fermeture graduée permet de choisir de meilleurs paramètres de régulation. On peut déterminer les valeurs de ξ et de β à partir de deux constantes de temps: la valeur de ξ d'après le temps TSS de fermeture lente de la turbine et la valeur de β d'après le temps Tm de fermeture rapide.
- b) La vanne de sécurité n'agit pas en cas de faible perturbation. Il importe de noter, pour choisir les régulateurs destinés à une centrale hydro-électrique dotée de vannes de sécurité, que le ralentissement temporaire du régulateur, la constante de temps du dispositif amortisseur et les autres paramètres connexes doivent présenter la bande d'ajustement la plus large possible.
- c) Les caractéristiques du débit différant dans la turbine et dans la vanne, il est difficile de les accorder parfaitement, de sorte que la pression baisse souvent dans les intervalles initiaux et finals de fermeture des aubes de guidage.

Une variation uniforme du débit dans l'ensemble du système peut s'obtenir par un choix rationnel des règles d'ouverture et de fermeture de la vanne de sécurité et des aubes de guidage. Ainsi, on retarde ou évite la baisse de pression.

II. PROGRES TECHNIQUES

A) Résistance hydraulique

L'installation d'une résistance hydraulique remplace la cheminée d'équilibre. Certaines centrales ont obtenu de bons résultats avec une vanne de sécurité, mais celle-ci ne convient pas partout. On ne peut l'adopter que dans les petites et moyennes centrales de moyenne ou haute chute. Pour une centrale de basse chute et gros débit, la vanne prend des dimensions encombrantes et devient complexe à fabriquer, l'aménagement des exutoires coûte cher, etc. En outre, son emploi est exclu avec des eaux chargées de limon.

En 1962, la centrale de Wang Jia Chang (puissance installée $3 \times 1\,360$ kW), dans la province de Hunan, a été la première à utiliser une résistance hydraulique, à la place d'une cheminée d'équilibre qui était difficile à construire au pied du barrage. Une telle cheminée aurait coûté 110 000 yuan, alors que l'installation de la résistance hydraulique est revenue au total à 30 000. Depuis, ce dispositif a été recommandé à d'autres centrales en Chine, et certaines améliorations lui ont été apportées.

Le dispositif utilise le même principe que la «compensation de charge» en cours d'étude à l'étranger. On doit calculer l'augmentation de la pression et de la vitesse en cas de chute brusque de la charge, pour voir s'il y a lieu ou non d'utiliser une résistance hydraulique dans une centrale. Cette résistance ne doit être installée que si la valeur calculée dépasse la valeur permise par les règlements techniques.

Quand la charge chute brusquement et que cesse simultanément la puissance active du stator du générateur, la résistance hydraulique se trouve enclenchée pour servir de charge fictive. Donc, le régulateur reste en position ouverte, l'aube de guidage se ferme légèrement et, dans la conduite forcée comme dans la turbine, ne se produisent que des effets transitoires accompagnés de faibles fluctuations. Quand, par sa prise en charge, la résistance hydraulique a stabilisé la turbine, on peut la délester graduellement et fermer normalement la turbine. Cette manœuvre assure que l'augmentation de pression et de vitesse reste dans les limites permises par les règlements.

Si la prise en charge de la résistance et la cessation de la puissance active du stator se font simultanément, la pression et la vitesse n'augmentent pas. En fait, comme il est impossible de synchroniser l'action des éléments déclencheurs, cette prise en charge retarde toujours sur la cessation de puissance active. Quand ce délai s'allonge, le dispositif limite moins bien l'augmentation de pression et de vitesse. Son efficacité est d'autant plus grande que la prise en charge est plus prompte. Il est donc souhaitable que les éléments déclencheurs soient particulièrement sensibles.

De l'analyse du fonctionnement des centrales, il ressort que des accidents ont pu se produire dans le générateur ou dans la résistance lors du branchement de celle-ci. On prévoit donc, dans l'étude technique, que l'un des groupes soit soudain entièrement délesté et ne charge pas la résistance. Dans ce cas, il faut assurer que l'augmentation de pression et de vitesse ne dépasse pas la limite permise par les règlements.

Il est rare que de tels accidents surviennent à deux groupes en même temps. Dans ce cas extrême, on peut laisser l'augmentation de pression dépasser la limite permise par les règlements pourvu qu'elle reste inférieure à la pression de rupture. (On peut recourir alors à la prolongation du temps de fermeture T_s .)

En prévision d'un délestage survenant à la résistance, il y a lieu d'installer une résistance de secours et de veiller particulièrement à son entretien et à sa réparation.

De l'expérience acquise dans trois centrales hydro-électriques, il ressort que:

- La résistance hydraulique peut remplacer une cheminée d'équilibre.
- Le délai d'intervention de cette résistance atténue son efficacité.

Il y a lieu de poursuivre l'étude de cette innovation technique, pour l'améliorer et la perfectionner.

B) Système d'excitation sur la troisième harmonique de la tension

Il s'agit là d'un mode perfectionné d'excitation. L'étude, la fabrication de prototypes et l'emploi à l'essai ont commencé en Chine au cours des années soixante. D'assez bons résultats ont été obtenus.

Actuellement, ce système d'excitation sur la troisième harmonique comprend deux types. L'un, destiné aux groupes de moins de 500 kW, utilise d'ordinaire un enroulement harmonique monophasé pour fournir le courant excité au champ magnétique du générateur par l'intermédiaire de redresseurs au silicium non thyristorisés. De construction simple et bon marché, il a le défaut d'être instable en montage parallèle et n'a donc pas servi souvent.

L'autre type est destiné aux groupes d'une puissance supérieure à 500 kW, qui tous utilisent des redresseurs à thyristors. Les enroulements sont du type triphasé et monophasé, avec harmonique sur la fondamentale, etc.

En Chine, trois provinces ont obtenu de bons résultats probatoires avec ce type d'excitation. Trois modèles de générateurs d'une puissance respective de 1 250, 630 et 800 kW, ont été construits et montés dans cinq ou six centrales et utilisés de cinq à huit ans avec une bonne stabilité, non seulement en fonctionnement isolé, mais aussi selon divers modes de fonctionnement en parallèle. Le modèle de 630 kW fabriqué dans la province de Gansu a été monté dans plus de cinq groupes.

Selon une première analyse, les avantages propres à ce système d'excitation sont les suivants:

1. Viabilité économique

Prenons par exemple le générateur de 630 kW, modèle TSW 143/39-12 (T pour le générateur synchrone, S pour hydro, W pour horizontal, 143/39 pour diamètre et longueur en centimètres des tôles du stator, 12 pour nombre de pôles). Au début, on se servait pour ce générateur d'un exciteur à courant continu et d'un ancien régulateur à excitation compound. Plus tard, on a modifié les pôles magnétiques du moteur et ajouté un enroulement du troisième harmonique à la rainure de l'anneau, sans changer le diamètre de sa tôle. Le générateur a été doté d'un jeu de redresseurs à thyristors de conception spéciale et d'un régulateur automatique. Ce nouveau système coûte bien moins: il revient à 87 pour cent du prix de l'ancien pour l'ensemble générateur et exciteur et à 58 pour cent seulement pour le seul exciteur. En outre, l'excitation sur l'harmonique exige moitié moins de cuivre. Même comparé au système généralement utilisé d'excitation par thyristor avec un transformateur aux bornes de sortie du générateur, ce nouveau système coûte moins et économise du cuivre.

2. Bonnes caractéristiques de fonctionnement

Aux avantages de tout mode d'excitation par thyristor s'ajoutent les caractéristiques propres à l'excitation sur harmonique de la tension, telles qu'une excellente aptitude à l'autoexcitation et l'insensibilité aux fluctuations de fréquence, etc.

3. Moins d'entretien et de réparations

Autre avantage pour les petites centrales, ce système requiert moins d'entretien et de réparations que l'exciteur en courant continu, où l'érosion du commutateur exige souvent une réparation en atelier.

Toutefois, ce mode d'excitation exige une étude et un calcul techniques poussés. Le générateur peut être revu si besoin est. La théorie de ce mode d'excitation n'est pas encore au point. La Chine en est encore au stade expérimental.

C) Assurance de qualité et meilleure fiabilité de l'alimentation

Les conditions qualitatives imposées à l'alimentation des réseaux locaux sont une variation de fréquence $< \pm 1$ Hz et une variation de tension $< + 5$ pour cent et $- 10$ pour cent.

Les MCH d'une puissance unitaire supérieure à 500 kW sont d'ordinaire dotées d'un régulateur à commande automatique et d'un régulateur de tension. En marche normale, la tension et la fréquence se maintiennent dans les limites permises. Pour les centrales d'une puissance unitaire inférieure à 500 kW, le régulateur est commandé à la main, et le système d'excitation est commandé soit manuellement soit automatiquement. Si la centrale fonctionne isolément, les variations de fréquence et de tension peuvent être fortes.

Avec le développement rapide des MCH, de petits réseaux ont été installés en maints endroits, contribuant à augmenter la fiabilité de l'alimentation. D'ordinaire, la puissance installée d'un réseau d'arrondissement varie de quelques 1 000 à 10 ou 20 000 kW. Par la pratique, de nombreux pays ont acquis une grande expérience, qu'on peut résumer comme suit:

1. Pour rendre l'alimentation plus fiable, il est nécessaire d'installer un petit réseau local. Son rattachement au réseau national est souhaitable si les conditions nécessaires sont remplies.
2. Ce petit réseau local doit disposer de plusieurs grands groupes pour supporter la charge et fonctionner de façon stable.
3. Le petit réseau local doit disposer d'une puissance installée et aussi d'une puissance de réserve qui soient suffisantes.
4. L'attribution de sa tâche à chaque centrale du réseau doit être assurée de façon judicieuse, par un renforcement du système distributeur.
5. La structure du réseau doit être améliorée pour accroître la qualité des lignes de transport.
6. La protection pour relais peut être améliorée par sa division en trois échelons, à savoir arrondissement, commune et brigade de production, pour limiter l'étendue du secteur qui subit les effets d'une panne.
7. Améliorer les communications: actuellement, toutes les centrales ne disposant pas d'une ligne d'alimentation de 35 kW sont dotées d'appareils de communication qui les relient au centre distributeur de l'arrondissement.

III. FORMATION DU PERSONNEL DES MCH

Cette formation se fait par diverses voies.

1. Etablissements de formation

- Instituts d'enseignement supérieur: une dizaine de facultés et de départements d'universités se spécialisent dans les ressources hydrologiques et l'hydro-énergie. Il existe aussi, dans les universités techniques, de nombreux départements dont les cours touchent aussi à l'hydro-énergie. Les diplômés (licenciés) de ces écoles forment d'ordinaire le personnel technique supérieur chargé de la prospection, de la conception, de la construction, de l'installation et des recherches pour le développement des MCH.
- Ecoles techniques secondaires: créées d'ordinaire par la province ou la municipalité, elles sont largement répandues dans chaque province ou préfecture (où abondent les ressources en eaux). Leurs diplômés sont d'ordinaire affectés à la Division de la protection des eaux de la province, de la préfecture ou de l'arrondissement. Ils forment le gros du personnel qui travaille dans les MCH de l'arrondissement.
- Ecoles techniques ouvrières: elles forment des travailleurs qualifiés pour la construction, l'installation, l'exploitation et l'entretien.

2. Cours de formation

Les cours de formation sont donnés à différents échelons. D'ordinaire, à l'échelon national, ils sont placés sous le patronage du ministère de la protection des eaux: les participants sont proposés par la province. Dans la plupart des cas, ce sont les piliers de son personnel.

Les cours de formation patronnés par la province sont suivis par des techniciens qualifiés qui travaillent à la section de la protection des eaux de l'arrondissement.

Ces cours de formation sont dispensés périodiquement selon les besoins.

3. Formation par la pratique

Les nouvelles MCH envoient leurs recrues se former par la pratique dans les centrales anciennes. Ensuite, elles reviennent travailler comme apprentis.

4. Formation en cours d'emploi.

IV. REDUCTION DU COUT DES MCH

Dans la pratique suivie en Chine, il existe maintes façon d/2 réduire ce coût:

- planification judicieuse et choix judicieux de l'emplacement;
- choix judicieux du genre d'exploitation et du plan de masse;

- utilisation à des fins multiples;
- sérialisation, normalisation et vulgarisation des machines et du matériel;
- mise en pratique des résultats de la recherche et du développement, tels que tuyaux en béton précontraint, vannes de sécurité, etc.
- bonne conception des montages électriques et des ouvrages du réseau, choix judicieux du voltage.

Toutes ces dispositions réduisent le coût des MCH. Pour leurs travaux de génie civil, l'utilisation des matériaux disponibles sur place est aussi un moyen efficace. Le peuple chinois a acquis une grande expérience de la construction d'ouvrages pour la protection des eaux et l'exploitation de leur énergie. Outre les barrages en terre, il existe plusieurs autres types de barrages de construction simple, intéressants par leur moindre coût.

Le barrage est le principal ouvrage qui sert à créer la chute d'eau dans les centrales à barrage. On trouve aussi des barrages dans les centrales à dérivation, mais leur rôle est alors surtout d'améliorer l'amenée d'eau.

Les barrages des MCH sont d'ordinaire du type à débordement servant à écrêter la crue dont d'autres ouvrages permettraient la lâchure. Ces barrages, s'ils sont bas, d'une hauteur inférieure à cinq ou six mètres, sont appelés déversoirs. Le peuple chinois a une longue tradition de construction de levées et de barrages dans sa lutte contre les catastrophes créées par les inondations et la sécheresse et a acquis une grande expérience. Outre les barrages en terre et les barrages en maçonnerie de pierre, il a aussi imaginé quelques barrages de construction simple. Ils aident à l'étude des moyens de réduire le coût des MCH. On trouvera décrits ci-dessous quelques barrages utilisant des matériaux disponibles sur place.

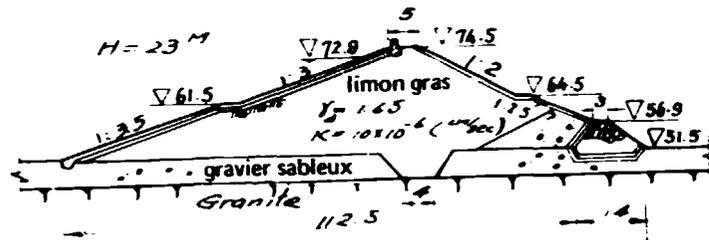
A) Barrages en terre

Ces barrages sont préférés en Chine. Ils permettent d'utiliser des matériaux disponibles sur place et facilitent la construction par les masses populaires car ils utilisent un appareillage simple. Si l'on dispose des matériaux, on peut les monter partout sur presque toutes les sortes de fondations, car ils ne demandent pas de conditions particulières.

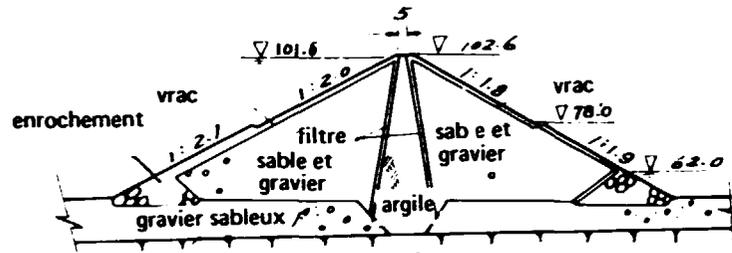
Pour les construire, on utilise divers matériaux des berges: loess, argile alluviale, terre graveleuse, sable et gravier, sable fin, etc. De plus, dans les provinces méridionales à climat humide et pluvieux, on s'est fréquemment servi de latérite. Cette terre (riche en argile) forme d'ordinaire le noyau imperméable. La figure 6-15 montre des types de ces barrages.

Dans les régions qui manquent de sable et de gravier mais disposent en abondance de terre lourde, les barrages homogènes prédominent. De construction simple, compactés au moyen d'outillage simple, ils sont très répandus en Chine, surtout dans les régions où existent de profonds dépôts de terre graveleuse lourde et de loess. Ils forment 65 pour cent de l'ensemble des barrages en terre.

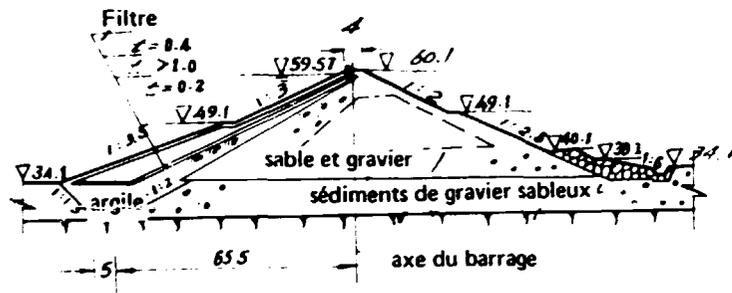
Figure 6-15
Type de barrage en terre



(a)



(b)



(c)

- (a) Homogène
- (b) à noyau central
- (c) à noyau incliné (en amont)

B) Barrages en maçonnerie de pierre

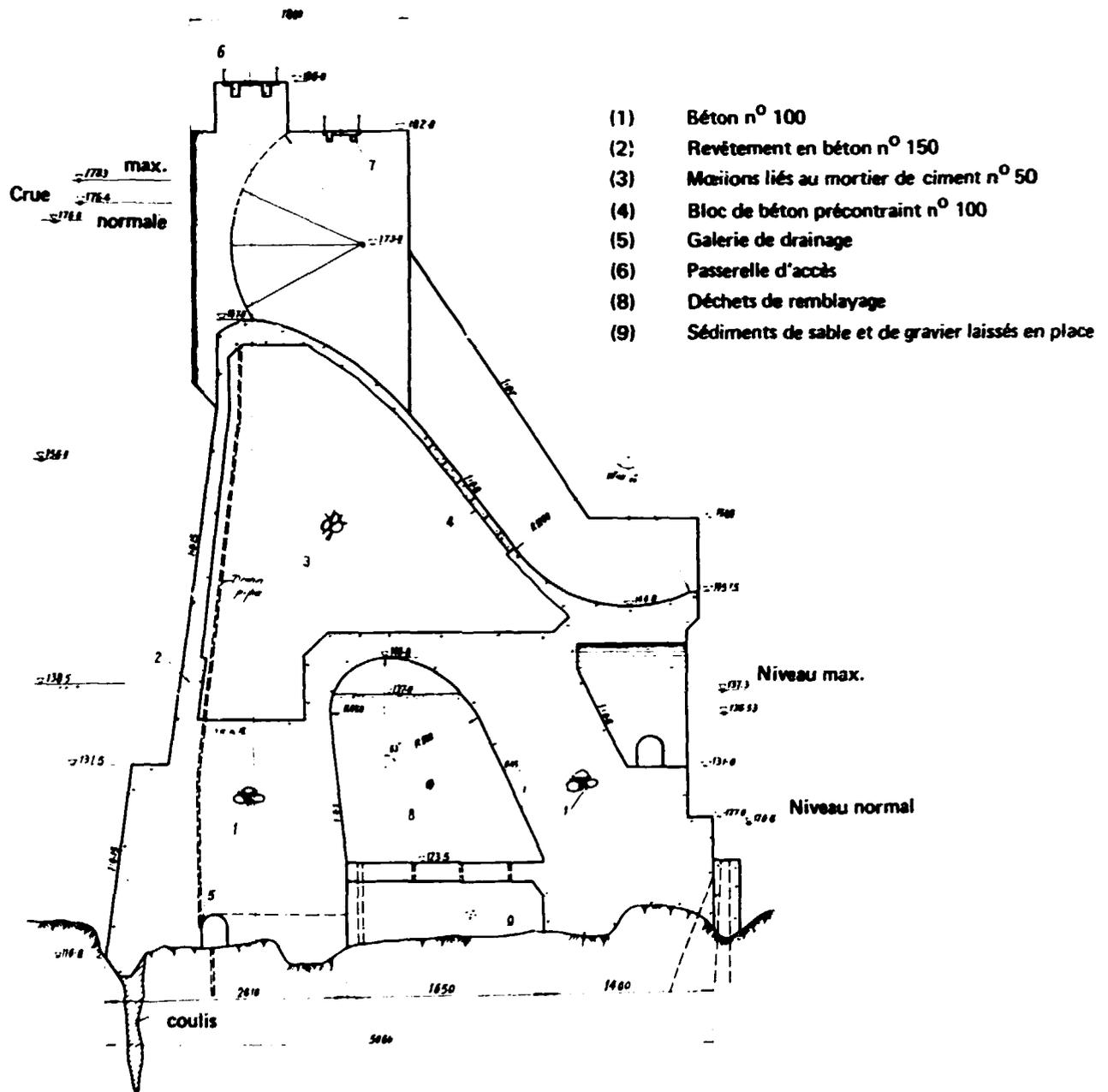
La Chine construit depuis longtemps des barrages en maçonnerie de pierre et a acquis beaucoup d'expérience. Ces barrages absorbent presque moitié moins de ciment que les barrages en béton et aussi moins de bois d'œuvre. Leur construction est à la portée des masses populaires, car elle se fait avec un outillage réduit, plus simple, facile à utiliser. Comparé aux barrages en terre et aux barrages mixtes, ce barrage aide mieux à maîtriser la crue, soit pendant leur édification, soit après. Pendant qu'on l'édifie, il peut être submergé sans dommage par une crue. En général, on peut y travailler effectivement de nombreux jours de l'année.

Numériquement, ils suivent les barrages en terre. Par exemple, dans la province de Hunan, quelque 70 MCH, d'une puissance totale installée de 413,5 mW (environ 60 pour cent de l'ensemble de cette puissance dans les MCH de la province), fonctionnent avec de tels barrages. Ceux-ci sont pour 60 pour cent des barrages-poids.

La figure 6-16 montre en coupe le barrage-poids, allégé par évidement, de Yanwotan, dans la province de Hunan. Les conditions géologiques étaient bonnes: saillies rocheuses aux deux flancs. Les dépôts de sable et de gravier sont profonds de huit à dix mètres. Le barrage a une longueur en crête de 59 mètres et une hauteur de 66 mètres. L'évidement est large de 16,5 mètres en bas et haut de 24 mètres. Sa superficie représente 15 pour cent de la superficie transversale du barrage. La fondation de l'évidement n'a pas été décapelée pour hâter la construction et réduire la sous-pression ascendante. Aussi le corps du barrage a-t-il été construit assez vite. En une seule saison sèche, le mur dépassait déjà l'étiage. En période de hautes eaux, il a été submergé sept fois (99 heures au total), mais on n'a ainsi perdu que cinq jours de travail. La lame déversante a atteint une hauteur de neuf mètres. Il n'y a pas eu de dommage. La construction a duré 20 mois, soit deux saisons sèches et une seule saison de hautes eaux.

Dans une vallée étroite où les conditions géologiques s'y prêtent, on peut construire un barrage-voûte, plus mince et de moindre volume (40 à 50 pour cent de pierre et environ 40 pour cent de ciment de moins que les barrages-poids). En outre, dans les régions montagneuses, à vallées larges, on a construit des barrages à voûtes multiples (30 – 50 pour cent de pierre de moins que le barrage-poids). La conception et la construction des barrages-poids, des barrages à voûte simple et à voûtes multiples figurent dans de nombreux manuels et ne seront pas traitées ici.

Figure 6-16
Barrage - poids évidé de Yanwotan



Vue en coupe

Unités:

Hauteurs: m

Dimensions: cm

C) Barrages de construction simple

1. Barrages à parement en dur

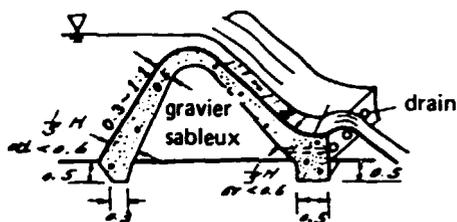
a) Construction

De tels barrages se composent d'un entassement de maellons secs ou d'un remblayage de sable ou de gravier qui forme leur corps, enrobé de maellons maçonnés au mortier de ciment ou de béton servant de parement contre l'infiltration et l'érosion. En 1965, ce type de barrage a été mis au point dans la province de Guangdong et donne satisfaction depuis. En 1967, dans la province de Zhejiang, on a construit à titre expérimental un type analogue, à parement en dallage de maellons secs (figure 6-17). Les barrages à parement conviennent comme déversoirs sur fondations rocheuses là où le sable et la pierre abondent, alors que manque la terre meuble.

Etant donné que le corps est formé de matériaux meubles, non maçonnés, comme maellons secs, enrochement ou sable et gravier, il suffit que le parement se fende pour que le barrage risque de s'effondrer. On doit donc veiller à sa conception technique et en suivre attentivement la construction.

Figure 6-17

Barrage à parement en dallage



(unité: m)

La parafouille qui soutient aussi le parement doit être creusée comme il convient et s'enfoncer de 0,5 mètre dans le roc. Le reste du barrage n'exige pas de fondation. Par exemple, un barrage de 17 mètres de haut dans la province de Guangdong repose sur un terrain de recouvrement profond de six mètres. On n'a enlevé que le sable et le gravier de la parafouille, sans toucher au terrain de recouvrement sous le noyau. Toutefois, on doit veiller à faire construire ce noyau dans les règles, pour éviter un tassement excessif qui, l'écartant du parement, pourrait endommager le barrage.

b) Etude technique

Pour faciliter la construction et réduire la pression latérale du noyau, le parement amont est en pente raide (1 : 0,3 à 1 : 1). Celle du parement aval est moindre (d'ordinaire 1 : 1 à 1 : 2, à cause du déversement). Mieux vaut construire en forme d'arc les parements en dallage. De cette façon, ils résistent quel que soit le tassement du noyau. On peut leur donner une pente encore moindre si besoin est.

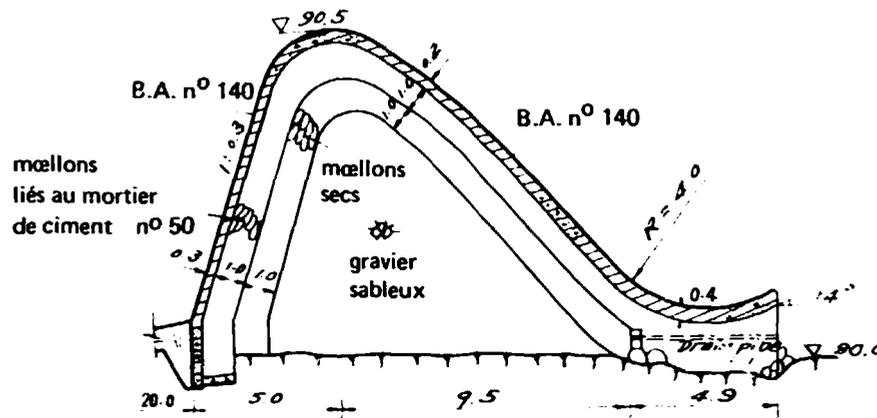
Le calcul de stabilité est essentiellement le même que pour un barrage-poids. Le parement et le noyau étant faits de matériaux différents, il faut tenir compte de leurs poids spécifiques respectifs, ainsi que des différents coefficients de frottement dans les fondations. Le noyau est considéré comme perméable. On néglige les forces ascendantes de sous-pression qu'il subit. La densité de placement est de $\gamma_1 = 2,1 \text{ T/m}^3$ (coefficient de vide < 25 pour cent) pour les maçons secs; de $\gamma_1 = 1,7$ à $1,8 \text{ T/m}^3$ pour le sable et le gravier; et de $\gamma_2 = 2,1$ à $2,2 \text{ T/m}^3$ pour le parement en dallage.

Le parement repose sur le noyau. Il est le plus souvent épais de 0,6 à 1,5 mètre (parfois jusqu'à 2 ou 3 mètres pour des barrages assez élevés). Ce parement est fait soit de maçons joints au mortier de ciment avec revêtement de même mortier, soit de maçons joints au mortier de ciment ou de béton avec revêtement en béton armé (figure 6-18). Le revêtement de béton armé est épais d'au moins 0,2 à 0,3 mètre, plus aux points de courbure. L'armature est faite de tiges d'acier longitudinales et transversales de 6 à 9 mm. L'espacement des joints de contraction le long de l'axe ne doit pas dépasser 40 mètres.

Au bout aval du parement sont percés des trous de drainage à filtres inversés placés sous la doucine pour réduire la pression de l'eau d'infiltration sur le parement. D'un diamètre de 10 à 15 cm, ils sont espacés de 3 à 5 mètres. Les filtres inversés sont à trois niveaux pour retenir les matériaux et empêcher que les trous se bouchent.

Pour rendre le parement plus rigide, réduire sa déformation et opposer une résistance à la pression latérale éventuelle des matériaux de remplissage, il est bon de construire des murs intérieurs de séparation longitudinale en pierre, espacés de 10 à 15 mètres. Leur épaisseur est de 1 à 1,5 mètre ($H \leq 10 \text{ m}$). Ainsi, le dommage que subirait une partie du barrage ne le mettrait pas en danger sur toute sa longueur.

Figure 6-18
Coupe d'un barrage à parement en dallage



(unité: m)

c) Techniques de construction

Les fondations étant achevées, on commence à poser les mællons joints au mortier de ciment du parement. Pour un grand barrage, on recouvre le roc de fondation d'un lit de béton de 10 à 30 cm, pour assurer un bon contact avec la maçonnerie. Les joints entre les mællons doivent être remplis de mortier de ciment. Le mur de chute doit être construit trois ou quatre jours avant le remplissage du noyau: il sera ainsi assez solide pour en supporter la pression latérale.

Selon l'expérience, la porosité des mællons secs ou du sable et du gravier formant le noyau dépasse 30 pour cent. Leur densité de placement n'est que de 1,6 à 1,8 T/m³. Du sable de rivière sert d'ordinaire à remplir les vides par épandage et ainsi à augmenter de 10 à 15 pour cent la densité de placement. Ce remplissage doit se faire couche par couche. On pose d'abord une couche de mællons de 30 à 50 cm d'épaisseur. Puis, on la recouvre de 5 à 7 cm de sable, qu'on arrose pour qu'il remplisse les vides entre les pierres.

Tableau 6-2
Cotes modèles d'un barrage à parement en dallage

Débit par mètre MCS/m	Hauteur (m)	Cotes en coupe		
		Largeur en crête (m)	Pente amont	Pente aval
< 3	< 3	1,5 – 2,0	1 : 0,75 – 1 : 1	1 : 1,3 – 1 : 1,5
	3 – 5	2,0	1 : 1	1 : 1,5 – 1 : 2,0
3 – 6	< 3	2,0	1 : 0,75 – 1 : 1	1 : 1,5 – 1 : 2,0
	3 – 5	2,0 – 2,5	1 : 1	1 : 2,0 – 1 : 2,5
6 – 10	< 3	2,0	1 : 0,75 – 1 : 1	1 : 2,0 – 1 : 2,5
	3 – 5	2,0 – 2,5	1 : 1	1 : 2,5 – 1 : 3,0

2. Barrages en pierres sèches

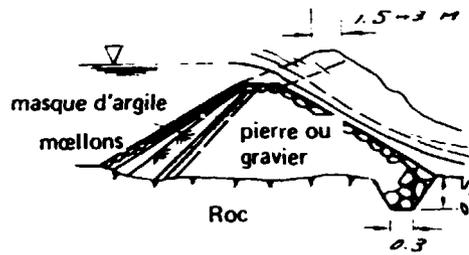
Comme son nom l'indique, un tel barrage n'exige pas de ciment. Il comprend un noyau formé d'enrochement, de gravier, ou de sable et de gravier, recouvert d'un parement amont et aval en pierres sèches. Un tel barrage utilise pleinement les matériaux disponibles sur place. Il peut aussi être construit par les masses populaires elles-mêmes, à peu de frais. Dans l'arrondissement de Fengshun, province de Guangdong, on en construit depuis des centaines d'années. Certains sont toujours en service, après avoir subi bien des inondations. Dans l'arrondissement de Chongjiang, province de Sichuan, le déversoir haut de 2 à 3 mètres construit en libage (dit «barrage à écailles») date de plus de 500 ans. Le barrage de gravier posé à sec, dans l'arrondissement de Yuanping, province de Shanxi, date de plus de 800 ans.

Dans les provinces de Guangdong, Zhejiang, Fukien, Sichuan et Hunan, on trouve divers types de barrages en pierres sèches construits avec les matériaux disponibles sur place et adaptés aux conditions locales. Ils se prêtent mieux aux fortes déformations des fondations, lesquelles peuvent être de sable et de gravier, aussi bien que de sable ou de terre.

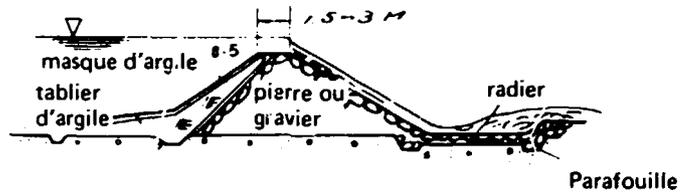
Durant leur construction, il n'est guère besoin de détourner les eaux de la rivière ou de creuser des puisards pour les fondations. On peut même poser les pierres sous l'eau quand la profondeur ne dépasse pas 0,5 mètre. Creuser la fondation est assez simple: on n'enlève que la couche alluviale de terre, de sable et de matières organiques. L'inconvénient réside dans une mauvaise liaison, cause d'infiltration. Pour y remédier, on doit surveiller très attentivement le choix des pierres et le travail de pose.

A ce genre de barrage, on donne d'ordinaire la forme d'un trapèze (voir coupe figure 6-19). le tableau 6-3 en donne les cotes modèles. La figure 6-20 en montre plusieurs types.

Figure 6-19
Coupe d'un barrage en maillons secs



(a) fondation rocheuse



(b) fondation meuble

Tableau 6-3
Cotes modèles d'un barrage en pierres sèches

Fondation	Hauteur (m)	Débit MCS/m	Largeur en crête (m)	Pente	
				Amont	Aval
Fondation rocheuse	< 2	< 3	1,5 – 2,0	1 : 0,5 – 1 : 0,75	1 : 1,5 – 1 : 2
Fondation rocheuse	< 2	3 – 6	2,0	1 : 0,75 – 1 : 1	1 : 2 – 1 : 2,5
Fondation rocheuse	2 – 5	< 3	2,0	1 : 0,75 – 1 : 1	1 : 2,5 – 1 : 3
Fondation rocheuse	2 – 5	3 – 6	2,0 – 2,5	1 : 0,75 – 1 : 1	1 : 3 – 1 : 3,5
	< 2	< 3	2,0	1 : 0,75 – 1 : 1	1 : 3 – 1 : 3,5
	< 2	3 – 6	2,0	1 : 0,75 – 1 : 1	1 : 3,5 – 1 : 4
Fondation de sable et de gravier	2 – 4	< 3	2,0	1 : 0,75 – 1 : 1	1 : 4 – 1 : 4,5
	2 – 4	3 – 6	2,0 – 2,5	1 : 1	1 : 4,5 – 1 : 5

a) Prévention de l'infiltration

Dans la construction de ces barrages, il faut surtout veiller: à prévenir les infiltrations par les flancs et les fondations; à maintenir la pente telle quelle; et à empêcher l'affouillement de la face aval.

- Fondation rocheuse. Comme le montre la figure 6-19 (a), le parement amont recouvre un masque d'argile imperméable d'une pente de 1 : 1,5 – 1 : 2,0. Son épaisseur, du quart ou du sixième de la hauteur de chute, n'est pas inférieure à 1 mètre en bas et à 0,5 mètre en haut. Du côté amont, on dispose encore, pour protéger le noyau, une couche de 15 à 20 cm de gravier, puis une couche de 20 à 40 cm de maellons secs tout-venant. Entre le masque d'argile et le corps du barrage, se trouvent ainsi deux à trois couches filtrantes. Si la rivière est limoneuse et si le barrage n'est pas protégé contre les infiltrations, on laisse celles-ci se produire pendant la deuxième et la troisième année. Le limon des crues remplit alors les vides et forme finalement un masque et tablier imperméables naturels sur la face amont.
- Fondation sur terrain de recouvrement. Avec ce genre de fondation, un tablier d'argile doit prolonger le masque imperméable de la face amont, comme le montre la figure 6-19 (b). Long de trois à cinq fois la hauteur de chute, il est épais de 1 à 1,5 mètre au pied du barrage et de 0,5 mètre à son extrémité amont. Le tablier se termine par une parafouille.

b) Radier

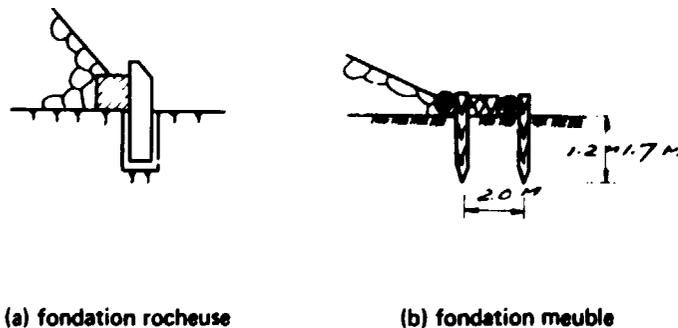
En terrain non rocheux, il faut construire un radier en aval. Long de deux à cinq fois la hauteur du barrage ou de 1,5 fois la profondeur du courant en amont, son épaisseur dépasse 0,5 mètre. S'il s'agit d'empierrement, les maillons doivent être étroitement serrés par compactage et exactement ajustés. Le bord aval du tablier est protégé par de gros blocs de roche ou par un enrochement entouré de pieux, sur une longueur de 3 à 5 fois la hauteur de chute.

c) Construction des fondations

L'essentiel est ici la construction de la fondation aval, dont dépend la stabilité du barrage. En général, sur du roc, on creuse une tranchée de 0,5 mètre qu'on remplit de maçonnerie cimentée, comme le montre la figure 6-19 (a). Un autre procédé consiste à dresser dans la tranchée des colonnes en pierre espacées de trois ou quatre mètres et à placer contre leur face amont une rangée de pierre de taille, comme le montre la figure 6-21 (a). Sur des sols meubles, après décapelage, on enfonce de 1,5 à 2 mètres une série de pieux espacés de 1 mètre avec une rangée horizontale de rondins à leur face amont, comme le montrent les figures 6-20 (a) et 6-21 (b). En outre, on construit un radier aval pour prévenir l'affouillement.

Figure 6-21

Fondation au pied aval d'un barrage en maillons secs



d) Contrôle de qualité

La construction doit s'opérer méticuleusement. Les petites pierres sont inutilisables. On place de gros blocs longs de 0,6 à 1 mètre et d'un poids dépassant 150 kilos sur l'extrados, le pied amont et aval, la crête et les autres endroits exposés à l'érosion. On choisira à cet effet des rocs sains résistant à l'usure et à l'altération. Les blocs de l'extrados seront très serrés. Les joints seront alternés pour assurer une bonne liaison.

La construction commence d'ordinaire par les deux extrémités pour aller vers le milieu. On peut travailler simultanément aux parties amont et aval. La face amont peut dépasser légèrement la face aval. On les relie ensuite à leur sommet par de bons blocs de pierre, bien compactés.

Après la mise en service, un tassement peut se produire, surtout après la première crue. Il peut aussi y avoir une forte infiltration qui fasse tasser ou disjoindre les blocs et même les déplace. Donc, on doit renforcer l'inspection et l'entretien. Une inspection soigneuse aura lieu à l'annonce d'une crue et après son passage. Les blocs disjoints ou déplacés seront réparés promptement.

Les petits ouvrages hydrauliques sont souvent construits en pierres sèches. La figure 6-20 en montre quatre types. Le type D est dit «à écailles». Il se caractérise par un appareillage de pierres incliné parallèlement à la face amont, de sorte que le courant est de 1 : 3 — 1 : 4. La figure 6-20 (c) montre une forme trapézoïdale plus commode à construire.

3. Barrages déversoirs en terre et enrochement

Ce barrage se compose de terre et de maillons. Il est très prisé parmi ceux de construction simple. Depuis 1956, les masses populaires de l'arrondissement de Wenling, dans la province de Zhejiang, ont bâti sur des fondations rocheuses beaucoup de ces barrages, qu'on appelle du type Chaokuche. Ils se prêtent à des conditions difficiles telles que vallées étroites, manque de matériaux meubles, nécessité de grandes fouilles pour le déversoir, etc. Par exemple, un barrage de ce type, haut de 20 mètres, a été achevé en 1966 à Chiaohsia (voir figure 6-22). Sa face aval est faite de pierres sèches avec un fruit de 1 : 0,2. Du côté amont se trouve l'enrochement. Celui-ci est couvert sur sa face amont par des couches filtrantes, revêtues d'un masque d'argile. La crête est protégée par des pierres de taille cimentées pour supporter le déversement des crues (voir figure 6-23). Le lit de la rivière étant de granit dur, aucun ouvrage ne dissipe l'énergie du courant en aval. Après plusieurs années d'exploitation, où la hauteur de la lame déversante n'a pas dépassé 1 mètre, il fonctionne toujours normalement.

Figure 6-22
Coupe du barrage mixte de Laxia

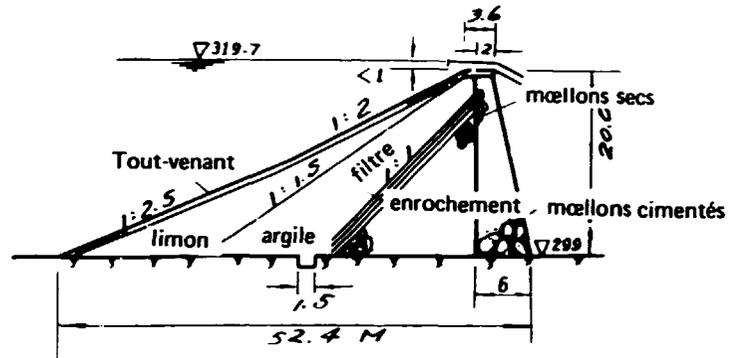
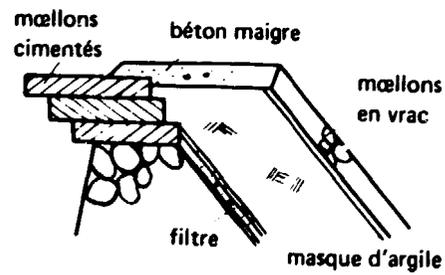


Figure 6-23
Crête d'un barrage mixte



Ce type de barrage convient aux vallées étroites à sol rocheux. Sa face aval est faite de moellons secs avec un fruit de 1 : 0,1 – 1 : 0,2, sous chute libre. Le volume des matériaux se répartit ainsi: moellons secs et enrochement environ 65 – 75 pour cent, terre meuble 30 pour cent. En cours de construction, le passage des crues n'empêche pas d'utiliser le corps du barrage. Aucun détournement n'est donc nécessaire.

La paroi aval supporte la pression latérale des eaux et des terres situées en amont. Il est bon d'avoir une solide fondation rocheuse. Chaque bloc doit peser plus de 300 kilos. On préférera des pierres de taille.

Les joints des blocs seront alternés. La porosité de l'enrochement est fixée à moins de 30 à 40 pour cent, avec une densité de placement de 1,6 – 1,7 T/m³. Des couches filtrantes sont placées entre le masque d'argile et l'enrochement. Elles doivent être plus épaisses que celles des barrages en terre pour mieux s'adapter aux déformations. La qualité de l'exécution ainsi que le choix des blocs de la face aval doivent être surveillés de près et régulièrement inspectés.

La coupe de la figure 6-24 et le tableau 6-4 donnent les dimensions d'un barrage de ce type. Sa hauteur est limitée à 20 mètres. La lame déversante ne doit pas avoir plus d'un mètre de haut. Quand la hauteur du barrage dépasse 15 mètres, il est recommandé de donner à la face amont une pente plus forte en haut qu'en bas.

Figure 6-24
Coupe du barrage mixte type Chaokuche

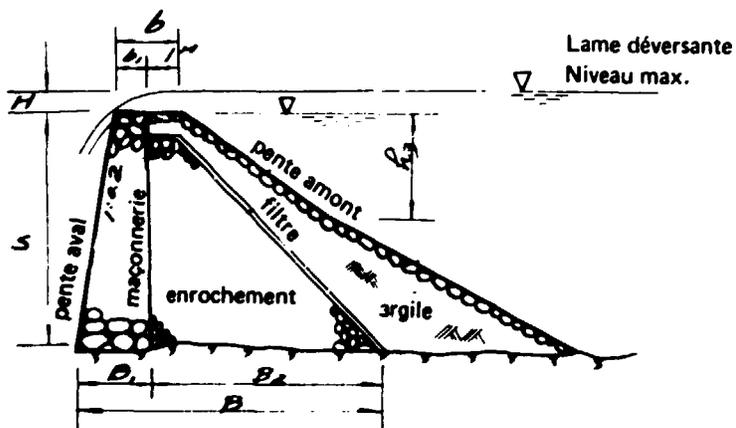


Tableau 6-4
Cotes modèles d'un barrage du type Chaokuche

Hauteur du barrage	Hauteur de la lame déversante H	Largeur totale en crête b	Largeur en haut de la face aval b ₁	Largeur en bas de la face aval B ₁	Largeur en bas de l'enrochement B ₂	Largeur totale B	Epaisseur de chaque couche filtrante (M)	Epaisseur totale des couches filtrantes (M)	Hauteur de la pente supérieure de la face amont h ₃ (M)	Face amont	
										Pente supérieure	Pente inférieure
10	1	2,5	1,5	3,5	10,5	14,0	0,2	0,6		1 : 1,5	1 : 1,5
15	1	2,5	1,5	4,5	15,5	20,0	0,3	0,9	5	1 : 1,5	1 : 1,75
20	1	3,0	2,0	6,0	20,5	26,5	0,4	1,2	10	1 : 1,75	1 : 2,0

4. Barrages à enrochement

Ces barrages diffèrent généralement des barrages à déversement. En enrochement simple, sans revêtement, ils ne peuvent former que des déversoirs de moins de 3 mètres de haut, comme le montre la figure 6-25. Leur pente amont est de 1 : 2 — 1 : 3. Leur pente aval est de 1 : 8 — 1 : 12. Malgré ce volume considérable, les crues les détruisent aisément. On doit donc les construire sur des lits de sable et de gravier quand on dispose de rocs en abondance. La technique est simple et le coût peu élevé.

Des murs de séparation en long, épais de 1 mètre, en moellons liés au mortier de ciment n° 50 sont espacés de 10 à 15 mètres dans le sens du courant (voir figure 6-25). Si la couche alluviale est mince, le mur de refend doit pénétrer jusqu'au roc. Si le lit est assez large, on ajoutera des murs transversaux. L'espace entre ces murs en long et en travers est rempli d'enrochement, de gravier et de sable grossier, puis compacté couche par couche. Le perré extérieur en maçonnerie doit être régulier et solide. Chaque bloc ne doit pas peser moins de 50 kilos. Pour prévenir l'affouillement en aval, on peut y prévoir un radier empierré. Long de deux à cinq fois la hauteur du déversoir, son épaisseur est de 0,5 mètre.

Figure 6-25
Coupe d'un barrage bas (déversoir) en enrochement

