

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mustapha STAMBOULI de
Mascara

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences agronomiques



جامعة مصطفى استمبولي
معسكر
كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم العلوم الزراعي

Polycopié de Cours

Ouvrages et réalisation

Présenté par :

Mohamed GLIZ

Maître de conférences B

Edition 2018

Faculté des sciences de la Nature et de la Vie

Sidi Said, 1645, Mascara BP 305 – Algérie

Tél +213 5 52 73 63 67 • gliz.moh68@gmail.com • <http://www.univ-mascara.dz/Facultes/snv/snv.htm>

Contenu

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RESSOURCES EN EAU ET LES OUVRAGES HYDRAULIQUES	6
I.1. Introduction	6
I.2. Répartition mondiale de l'eau	9
I.3. Données de bases sur les ressources en eau de l'Algérie	9
I.3.1. Les caractéristiques naturelles	9
I.3.2 Les ressources en eau.....	10
A)- Les précipitations	10
B)- Les potentialités globales en eau	11
C)- Les potentialités par habitant.....	11
D)- Capacités de mobilisation	11
E)- Besoins ou Demandes en Eaux de l'Algérie.....	12
F)- Bilan Ressources/Besoins en eau.....	12
G) - Projections à l'Horizon 2030	13
I.3.3. La nouvelle politique de l'eau en Algérie.....	13
Chapitre II: OUVRAGES DE RETENUES	14
II.1. Définition des termes utilisés	14
II.2. Classification des barrages	16
II.2.1. Classification des retenues d'après les utilisations diverses de l'eau	16
II.2.2. Classification des retenues d'après la structure	16
II.2.3 Classification des barrages selon le type de matériaux et le mode de résistance à la poussée de l'eau.....	16
II.2.4 Autres classifications des barrages.....	17
II.3. Procédure de conception	18
Deuxième phase : étude d'Avant Projet Détaillé (APD).....	19
II.4. Choix du site et des caractéristiques d'un barrage	19
II.4.1. Conditions relatives à la topographie	20
II.4.2. Conditions géologiques	20
II.4.2.1. La stabilité du barrage	20
Travaux dereconnaissance	20
Procédés géophysiques.....	21
II.4.2.2. Etanchéité de la retenue	22
Définitions.....	22
Méthodes de mesure de la perméabilité.....	23
b1) Roches consistantes.....	24

b2) Terrains alluvionnaires.....	24
Etude géologique.....	25
II.4.3. Conditions hydrologiques.....	26
II.4.4. Conditions relatives à la géographie humaine.....	26
II.5. Travaux d'ouvrages hydrotechniques	26
II.5.1. Sujétions communes	26
II.5.2. Dispositions constructives	26
II.5.2.1 Procédés de construction en lit de rivière.....	27
II.5.2.2. Etanchéité et consolidation des fondations.....	31
II.6. Actions et remèdes des ouvrages hydrauliques	31
II.6.1. Actions.....	32
II-6.2. Remèdes	32
Chapitre.III : BARRAGES COLLINAIRES	36
III.1 Définition, objectifs et justifications.....	36
III.2. Schémas types de l'aménagement collinaire	36
III.3. Phases de réalisation d'un barrage Collinaire.....	37
III.4. Différents types des barrages collinaires.....	39
III.5. Critères de conception des digues en terre et/ou en enrochements	41
III.6. Les fondations et les traitements à adopter.....	42
III.6.1. Les fondations en matériaux rocheux	42
III.6.2. Les fondations en matériaux granulaires grossiers.....	43
III.6.3. Les fondations en matériaux fins à très fins	44
Fondations saturées	44
Fondations nonsaturées	44
III.7. Les dimensions de la digue	45
III.7.1. Courbe hauteurs-capacités de la retenue	45
III.7.2. Hauteur de la digue.....	46
Hauteur de retenue normale	46
Charge maximale au-dessus du déversoir.....	46
III.7.3. Largeur en crête de la digue	47
III.7.4. Pentes des talus de la digue	48
Barrages à noyau sur fondations stables	49
Barrages homogène sur fondations stables	49
Classification des matériaux cohérents.....	50
III.7.5. Volume de la digue.....	51
III.8. Etudes des infiltrations dans le barrage et la fondation	52
Cas d'un massif homogène relativement étanche	54

Cas d'un massif imperméable ancré dans l'assise perméable.....	54
CHAPITRE IV: OUVRAGE SOUTERRAIN "LES FOGGARAS"	56
IV.1. Introduction	56
IV.2. Historique et origine	56
IV.3. Les différents types des Foggaras	58
a. Les Foggaras du continental intercalaire.....	58
b. Les Foggaras du Tertiaire continental et de la Dalle calcaire	58
c. Les Foggaras des alluvions quaternaires	58
IV.4. Description de la Foggara	58
IV.5. Principe de fonctionnement	61
IV.6. Facteurs influençant le fonctionnement de la foggara.....	61
a. La pente	61
b. La forme de la galerie.....	62
IV.7. Evolution de la foggara.....	62
IV.8. Le partage et la distribution de L'eau d'une Foggara	64
IV.8.1. La méthode volumique.....	64
IV.8.2. La méthode horaire.....	64
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	66

Avant propos

La mobilisation de l'eau est un facteur important pour la satisfaction des besoins des populations (irrigation, usages domestiques, usage pastoral). Les ouvrages hydrauliques (barrages, réservoirs divers) participent à l'atteinte de la sécurité alimentaire, à la création de nouveaux revenus et à la préservation de l'environnement. Lors de la conception d'un ouvrage hydraulique, on peut distinguer trois phases bien caractérisées :

Première phase : études préliminaires ou Avant Projet Sommaire (APS)

Deuxième phase : étude d'Avant Projet Détaillé (APD)

Troisième phase : études de réalisation des ouvrages (dossier d'exécution)

Ce polycopié, adressé aux étudiants de Master 2 en Hydrogéologie, vise à offrir un large aperçu sur ces trois phases, en décrivant le détail des différentes études à entreprendre depuis les reconnaissances de la zone développer jusqu'à la réalisation des ouvrages.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RESSOURCES EN EAU ET LES OUVRAGES
HYDRAULIQUES

I.1. Introduction

Les ouvrages qui servent à mettre en œuvre une ou plusieurs branches de l'économie de l'eau s'appellent ouvrages hydrauliques "Waters Works".

Suivant que ces ouvrages sont construits en rivières, en lacs ou à la mer, nous distinguons les ouvrages fluviaux, lagunaires ou maritimes. Ces derniers ouvrages ne seront pas traités dans le cadre de ce cours.

Les ouvrages hydrauliques présentent trois particularités :

- L'action permanente de l'eau peut entraîner l'usure mécanique, la cavitation des parties des ouvrages en contact avec le courant (pile) et à la rupture de certaines structures.
- La construction d'un ouvrage influe considérablement sur l'environnement (inondation, changement écologique) et entraîne une modification du régime naturel de l'écoulement. Dans le cas d'un barrage, cette modification se traduit par une surélévation du niveau en amont et des dépôts de sédiments de plus en plus fins en s'approchant du barrage (Figure I.1).
- Les phénomènes d'érosion d'infiltration menacent leur stabilité

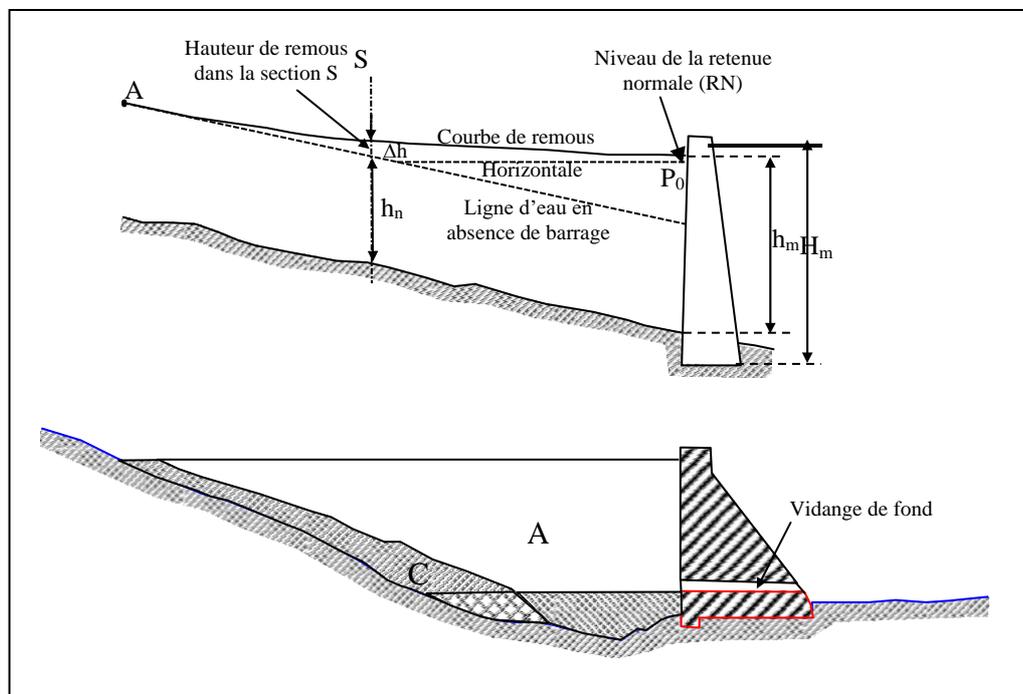


Figure I.1 : Profil en Long Schématique d'un Barrage et de sa Retenue
(d'après Ginocchio, 1959)

Suivant leur rôle, les ouvrages hydrauliques peuvent être classifiés comme suit :

- ouvrage de retenue (barrage) : prise d'eau, évacuateur et bassin de dissipation
- ouvrage de transport d'eau (canaux, conduites et galerie)
- ouvrages spéciaux

Les déversoirs, les ouvrages de dissipation d'énergie, les galeries et les vannes, forment les ouvrages annexes du barrage. Un ouvrage de retenue ou barrage, est un ouvrage destiné à retenir l'eau contre l'une de ses faces (face amont) à un niveau supérieur à celui qui règne sur l'autre face (face aval). La réserve d'eau est stockée en période d'abondance et distribuée en période sèche. Un barrage comporte le plus souvent un massif constituant le corps du barrage encastré sur fond et les berges du cours d'eau. Il est fréquemment complété par des parties mobiles, presque toujours métalliques, mais de dimensions et de dispositions très diverses, qui servent à régler l'écoulement des eaux.

Les barrages en terre et en béton sont les plus communément utilisés. Les barrages en terre peuvent être construits avec du sable, de l'argile, du gravier, du cailloux ou une combinaison de ces matériaux. Ils ont une section trapézoïdale (Figure I.2) avec une pente $m = \text{ctg } \theta$ avec θ angle formé par la ligne inclinée et l'horizontal) de 0.9 à 1.2 comme minimum (pour les roches) et 1.5 (pour les barrages en terre). Suivant le matériau et la consistance de la fondation, la pente peut être supérieure ou égale à 3.5.

Les barrages en béton font partie des barrages gravités comportant les barrages

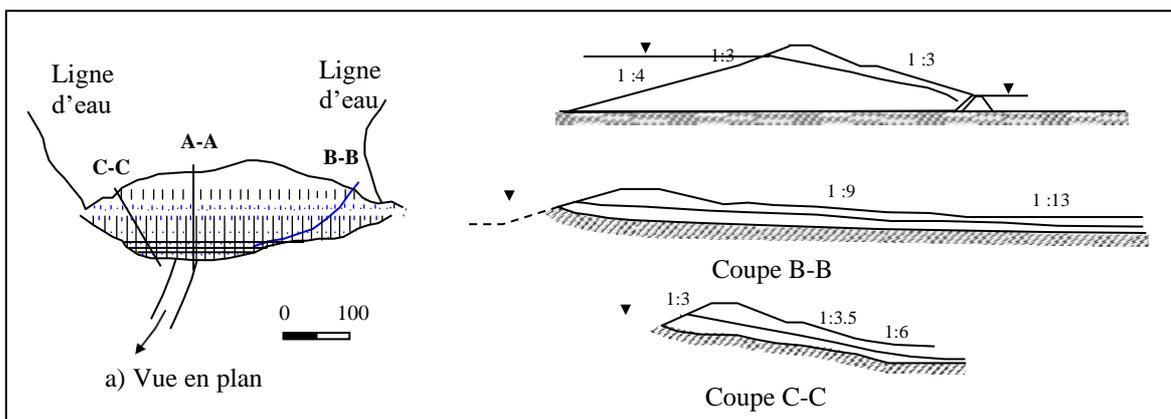


Figure I.2 : Schéma d'un barrage en terre (Grishin, 1982).

contrefort (buttress) et voûte (arch). Les barrages gravités peuvent avoir une section triangulaire avec une largeur au lit d'environ 2/3 de sa hauteur, ou trapézoïdale. La forme d'un barrage est soit massive (Figures I.3, a, b et c), soit formée d'une plaque qui constitue le radier du barrage (Figure I.3 d). Ce radier forme, quelquefois, le corps du barrage (Figure I.3 c) permet de supporter une partie verticale comportant des piles fixes en maçonnerie réunies

l'une à l'autre par des éléments mobiles (vannes).

Les barrages voûtes sont généralement curvilignes en plan (d'où leur nom) présentant une face convexe en face amont; la section en travers (section verticale) de ces barrages sont relativement des parois minces courbées.

Les barrages contrefort sont des obstacles moins épais que les barrages gravités, soutenus par des contre forts placé normalement et à l'aval des ces obstacles.

Selon la capacité de stockage, le volume et la hauteur de la digue, les barrages sont classés en:

Grands Barrages

Barrages Collinaires

Lacs Collinaires

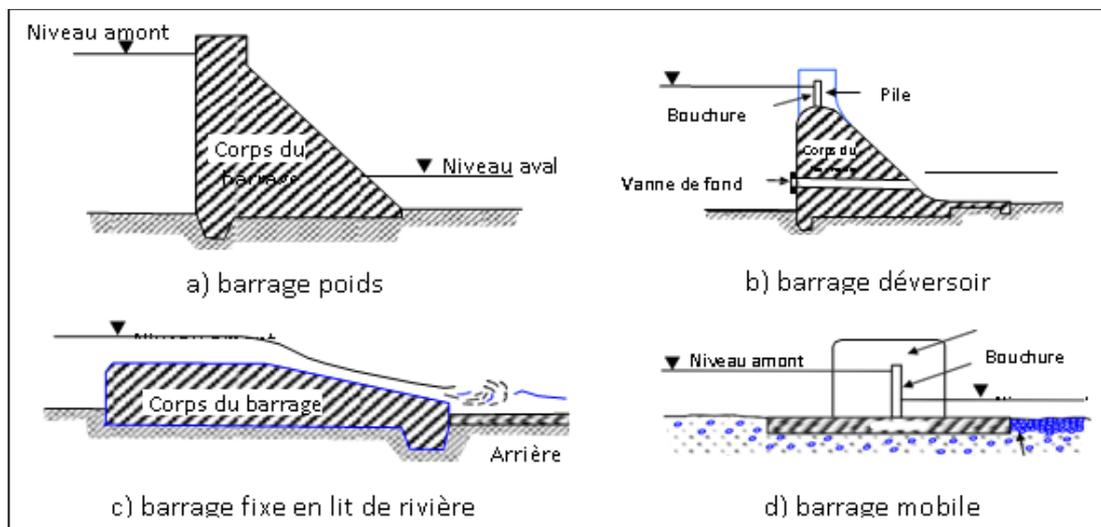


Figure I.3 : Caractéristiques et types de barrages (d'après Aubert 1949)

Les ouvrages d'adduction sont destinés à transporter l'eau à un débit bien spécifié pour des buts multiple, tel que l'alimentation d'une turbine, l'irrigation, la satisfaction des demandes en eau des régions semis arides, fournir les demandes domestiques et industriels, le transfert de l'eau, le drainage, la navigation. Ces ouvrages comportent les canaux, les galerie, les ponts, les ponceaux (buses et dalots).

Les ouvrages spéciaux permettent de contrôler le débit (vannes), assurer la production de l'énergie électrique (station hydroélectrique), station de pompage, dispositif anti-bélier, protection des rives et la correction des lits des oueds, la lutte contre le glissements du terrain et l'inondation,

L'ensemble de ces ouvrages hydrauliques permet de répondre à des objectifs économiques variables constituent alors un projet intégré de gestion des ressources en eau.

I.2. Répartition mondiale de l'eau

La quantité d'eau totale de la planète tiendrait dans un cube de 1 120 km de côté : Cela représente 1400 millions de km³ (environ 400 fois le volume de la méditerranée). L'eau salée constitue plus de 97 % de l'eau sur Terre, l'eau douce, moins de 3 %, soit un total de 42 millions de km³. Mais l'homme ne peut puiser que 14 millions de km³ douce : c'est l'eau présente dans les lacs, les fleuves et les nappes souterraines. En effet, on ne compte pas l'eau immobilisée dans les glaces des pôles, c'est à dire 70 % de l'eau douce présente sur Terre.

La quantité totale d'eau douce est la même depuis son apparition sur terre, il ya environ 3, 4 milliards d'années. Mais sa répartition est très inégale. Neuf pays se partagent 60 % des ressources naturelles d'eau douce du monde : le Brésil, la Russie, les États Canada, la Chine, l'Indonésie, l'Inde, la Colombie et le Pérou. À l'inverse, certains pays ont des ressources très faibles, presque nulles. C'est le cas du Koweït, de Bahreïn, dont les ressources sont presque inexistantes. L'utilisation des prélèvements mondiaux en eau concerne l'agriculture : 70 %, Les industries : 20 % et la consommation domestique : 10%.

Actuellement, 600 millions d'être humains manquent d'eau, la montée démographique peut générer un stress hydrique pour 3,2 milliards de personnes à l'horizon 2025. Le stress hydrique se fait sentir lorsque il y a moins de 1700m³ par habitant pour toutes les utilisations principales (domestiques, industrielles, agricoles et écosystèmes naturels ; alors que l'eau se fait rare lorsque ce seuil est inférieur à 1000m³ par habitant.

I.3. Données de bases sur les ressources en eau de l'Algérie

I.3.1. Les caractéristiques naturelles

Le territoire algérien s'étend sur 2,4 millions de km². Du Nord au Sud, on trouve trois ensembles très contrastés, différents par leur relief et leur morphologie. Tout d'abord, la chaîne du Tell et le littoral, puis la chaîne de l'Atlas qui longe les Hautes Plaines plus au Sud, enfin, le désert saharien qui s'étend au-delà du massif de l'Atlas. C'est cette disposition du relief qui, avec les conditions climatiques, détermine le potentiel agricole et les ressources en eau du pays.

La majeure partie du pays (87%) est un désert où les précipitations sont quasi nulles, mais qui recèle d'importantes ressources fossiles d'eaux souterraines. La partie Nord du pays est caractérisée par son climat méditerranéen ; elle dispose de ressources en eau renouvelables, tant pour les eaux de surfaces que pour les nappes phréatiques. Les 90% des eaux de surface sont situées dans la région du Tell qui couvre environ 7% du territoire.

Le pays est également caractérisé par une forte disparité entre l'Est et l'Ouest. La région

Ouest est bien dotée en plaines mais est peu arrosée. La partie Est du pays est une zone montagneuse où coulent les principaux fleuves.

Le climat de l'Algérie connu pour sa grande diversité spatiale et sa grande variabilité interannuelle se distingue par :

- une variabilité spatiale et temporelle marquée. S'il pleut uniquement 350 mm en moyenne dans la région Ouest, cette moyenne peut dépasser les 1000 mm à l'Est et atteindre, certaines années, les 2000 mm sur les reliefs élevés.
- une pluviométrie qui décroît rapidement vers le Sud. A la lisière du Sahara, la moyenne devient inférieure à 100 mm.
- une concentration des précipitations en un nombre réduit de mois durant l'année (de décembre à avril représentant les 5 mois les plus productifs).

I.3.2 Les ressources en eau

A)- Les précipitations

L'apport total des précipitations en Algérie est de l'ordre de 130 milliards de mètres cubes par an, ce qui est sensiblement égal aux volumes des précipitations enregistrées au Maroc, évaluées à 150 milliards de mètres cubes, mais largement en dessous du volume reçu par la France qui est estimé à 440 milliards de mètres cubes (Truchot, 2006). L'apport moyen calculé sur 25 ans, pour l'Algérie tellienne est évalué à 65 milliards de m³, très mal répartis ; 47 milliards s'évaporent, 3 s'infiltrent et 15 s'écoulent vers la mer (3 milliards provenant des oueds de l'Ouest dont les bassins versants occupent 3/5 du territoire et 12 milliards provenant des oueds de l'Est couvrant seulement 2/5 du territoire (Arrus, 1985).

Le climat de l'Algérie est connu pour sa diversité géographique et sa grande variabilité pluviométrique interannuelle. Les précipitations diminuent du Nord au Sud et d'Est en Ouest.

. Deux éléments sont à distinguer: une variabilité en termes de pluviométrie entre l'Ouest (350 mm de pluie en moyenne), l'Est (1 000 mm) et les reliefs élevés (où certaines années on peut atteindre 2 000 mm), qui devient quasi inexistante à partir du Sahara (moyenne inférieure à 100 mm) et une concentration des précipitations dans le temps (de décembre à avril chaque année, au moment où la demande climatique, l'évapotranspiration, est la plus faible).

Les précipitations sont extrêmement irrégulières et mal distribuées géographiquement, car elles sont fonction, non seulement de la latitude, mais également d'autres facteurs tels que le relief, la proximité de la mer ou de la montagne, l'exposition.

B)- Les potentialités globales en eau

Estimées en moyenne à **18 milliards de m³/an** dont :

- 12,5 milliards de m³ dans les régions Nord :
 - 10 milliards de m³ (écoulements superficiels)
 - 2,5 milliards de m³ (ressources souterraines renouvelables)
- 5.5 milliards dans les régions sahariennes :
 - 0.5 milliards m³ (écoulements superficiels)
 - 5.0 milliards m³ (ressources souterraines fossiles)

C)- Les potentialités par habitant

Dans la littérature relative à l'eau, l'Algérie se situe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques. C'est-à-dire, en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an. Ce seuil est basé sur l'ensemble des besoins en eau pour l'agriculture, les villes et l'industrie ainsi que pour le maintien des écosystèmes, d'eau douce (Schiffler, 2002). Le ratio ressources en eau par habitant et par an qui était de 1500 m³ en 1962, n'était plus que de 720 m³ en 1990, de 630 m³ en 1998 et autour de 175 l/ha/j en 2013, selon le ministère des ressources en eau.

D)- Capacités de mobilisation

Les capacités totales de mobilisation sont de **12 milliards de m³/an** dont:

- Un volume de **6,8** Milliards au Nord (5 Milliards de m³/an pour les eaux de surface, 1.8 Milliards de m³/an pour les eaux souterraines).
- Un volume de **5,2** Milliards de m³/an dans les régions Sahariennes

Ces ressources sont principalement mobilisées par :

- **Les barrages** : actuellement de 70 barrages opérationnels pour une capacité globale estimée à 7 milliards de m³ et un volume régularisable de 3 milliards de m³. Elle prévoit la construction de 30 barrages, pour l'échéance 2015-2019. Les capacités de stockage devront augmenter de 1,5 milliard de mètres cubes.
- **L'exploitation des eaux souterraines** atteint actuellement 1.6 milliards de m³ par forages et 85 millions de m³ par foggaras
- **Le dessalement** de l'eau de mer est pratiqué dans 23 stations pour une capacité de 347 000 m³/jour dont trois grandes stations :
 - La station du Hamma à Alger: avec 200 000 m³/jour couplée avec la centrale électrique du Hamma et entrée en production en 2008 ;

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RESSOURCES EN EAU ET LES OUVRAGES HYDRAULIQUES

- La station d'Arzew près d'Oran: avec 90 000 m³/jour, et production d'électricité (318Mégawatts).
- La station de Skikda avec 100 000 m³/jour, et production d'électricité de 800 Mégawatts
- Le recyclage des eaux usées épurées : Le volume annuel d'eaux usées rejetées est estimé à 730 millions de m³. La capacité installée d'épuration des eaux usées est de 365 millions de m³/an correspondant à 65 stations d'épuration en exploitation.

E)- Besoins ou Demandes en Eaux de l'Algérie

Les deux principaux utilisateurs de l'eau en Algérie sont le secteur agricole et domestique, mais la part du secteur de l'agriculture tend de plus en plus à baisser devant la concurrence de l'alimentation en eau potable. Le nombre de logements raccordés à un réseau public d'eau potable est passé de 1.755.900 (58% des logements) en 1987 à 2 903 482 (71,36%) en 1998 selon le Recensement Général de la Population et l'Habitat (RGPH). Le tableau suivant présente les quantités d'eaux consommées par les différents secteurs d'activité.

Tableau I.1: Utilisation de l'eau par les différents secteurs d'activité

Désignation	1975	1980	1989	1999	2002
Agriculture (10⁶ m³)	2 620	2 450	2 290	2 029	1800
	80,6%	74,6%	69,7%	62%	54,5%
Industrie (10⁶ m³)	100	133	166	116	200
	3,07%	4,05%	5,05%	3,5%	6%
Secteur domestique (10⁶ m³)	530	700	830	1130	1300
	16,3%	21,3%	25,2%	34,5%	39,5%
Total (10⁶ m³)	3 250	3 283	3 286	3 275	3 300

F)- Bilan Ressources/Besoins en eau

L'Algérie enregistre un déficit énorme en approvisionnement d'eau (tableau I.2), si on considère l'alimentation en eau potable, les volumes distribués, qui sont de l'ordre de 1,6 milliards m³, provenant de (30 % des barrages et 70 % des nappes souterraines), ne représente qu'une dotation par personne de 53 m³/an, soit 145 l/j. valeur nettement inférieure par rapport à la norme de l'OMS qui la fixe à 250 litres par jour et par habitant.

Concernant le secteur agricole, dans les années 2000, seulement 40 % des besoins en eau agricole étaient satisfaits : le volume disponible en eau était inférieur à 200 millions de m³ pour des besoins avoisinants les 500 millions de m³ à raison de 5 000 m³/ha.

Tableau I.2 : Niveau de satisfaction de la demande en eau

Années	2000	2008	2009	2010	2011	2013
Besoins en eau total -tous secteurs- (10⁹m³)	30,41	34,59	35,27	35,97	36,71	37
Approvisionnement -tous secteurs- (10⁹m³)	3,25	5,40	5,80	6,10	6,40	9,65
Taux de satisfaction (%)	10,7	15,6	16,4	16,9	17,4	26

G) - Projections à l'Horizon 2030

Des évaluations faites à partir d'études préalables dans le cadre des travaux d'actualisation du Plan National Hydraulique montrent que :

- L'extension des surfaces agricoles jusqu'à **2 000 000 ha** et le développement de cultures céréalières et fourragères, exigent **20 milliards de m³** d'eau d'irrigation
- La demande en **eau potable** serait d'environ **3, 2 milliards de m³/an**
- Lademande en **eau industrielle** serait de l'ordre de **200 000m³/an**

I.3.3. La nouvelle politique de l'eau en Algérie

A l'instar des autres pays, l'Algérie a enrichi sa politique nationale de l'eau en l'adaptant à toutes les mutations nées aussi bien des changements climatiques, de l'évolution, des enjeux et des besoins sociaux-économiques ainsi que d'une perception du coût réel de l'eau et des conséquences économiques. Dès le début des années 2000, les pouvoirs publics ont décidé d'ériger la question de l'eau en priorité de premier ordre. Cette priorité s'est traduite par une forte impulsion de l'intervention de l'État sur les axes stratégiques majeurs suivants :

- 1. Accroître et sécuriser la mobilisation de ressources en eau conventionnelles** (renouvelables et fossiles) et **non conventionnelles** (dessalement et eaux usées épurées) et ceci, pour assurer la couverture des besoins en eau domestique, industrielle et agricole.
- 2. Garantir l'accès à l'eau** et améliorer la qualité de service à travers la réhabilitation et la modernisation des infrastructures d'adduction et de distribution d'eau potable pour réduire au maximum les pertes et améliorer la qualité de service.
- 3. Assurer l'accès à l'assainissement** et protéger les écosystèmes hydriques au moyen de la réhabilitation, modernisation et l'extension des infrastructures d'assainissement et d'épuration des eaux usées pour préserver et réutiliser une ressource en eau limitée.
- 4. Soutenir la stratégie de sécurité alimentaire** avec la modernisation et l'extension des superficies irriguées
- 5. Assurer une bonne gouvernance de l'eau** et une amélioration des indicateurs de gestion

CHAPITRE II: OUVRAGES DE RETENUES

II.1.Définition des termes utilisés

Un barrage est ouvrage établi dans le lit d'un cours d'eau dans le but de créer une dénivellation entre les plans d'eau situés en amont et en aval. Considérons la section en travers d'un barrage représentée sur la Figure II.1. Le Lac ou bassin artificiel à l'amont d'un barrage, dans lequel une certaine quantité d'eau est accumulée est appelée retenue. La Morphologie de l'aire couverte par la retenue est la cuvette. Le réservoir d'eau est une retenue dont l'exploitation s'effectue à niveau variable en vue de stocker et déstocker de l'eau. Le tableau II.1 regroupe la signification de ces différents termes utilisés dans ce chapitre et le reste du cours.

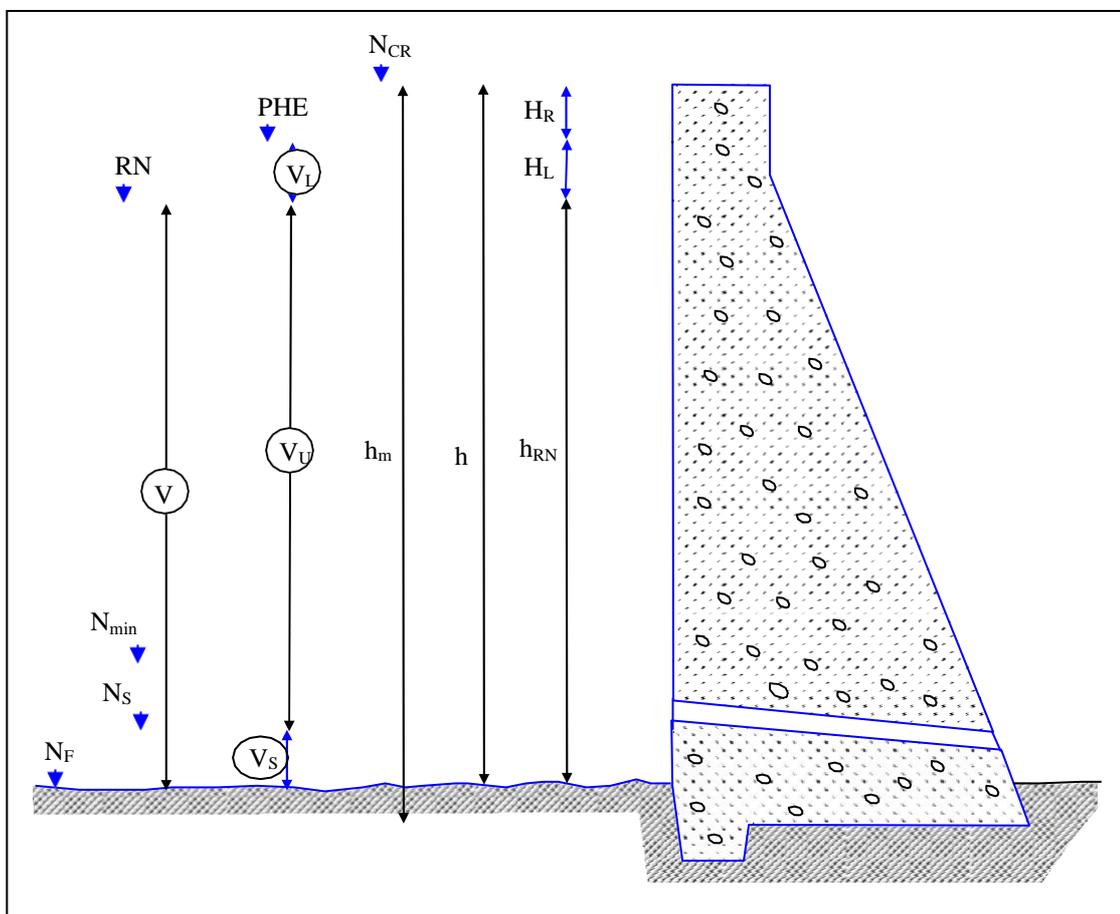


Figure II.1 : Caractéristiques de la capacité d'une retenue
(d'après PNUD/OPE, 1987)

Tableau II.1 : Définition des termes utilisés (voir Figure II.1)

Termes	Définitions	Symboles
Niveau (ou cote) des dépôts solide (mNGT)	Cote correspondante aux dépôts solides dans la retenue	NS
Niveau (ou cote) du lit de l'oued (m NGT)	Cote du point le plus bas du fond du lit du cours d'eau en correspondance avec le parement amont du barrage	NF
Niveau (ou cote) minimal d'exploitation (m NGT)	Cote minimal du niveau de l'eau dans la retenue où l'eau accumulée peut être dérivée par la prise d'eau pour l'utilisation prévue	N_{min}
Niveau (ou cote) normal de la retenue (m NGT)	Cote du niveau de l'eau dans la retenue à laquelle commence le déversement dans l'évacuateur de crues.	RN
Niveau (ou cote) des plus hautes eaux (m NGT)	Cote maximale à laquelle peut arriver le niveau de l'eau dans la retenue au cas où se produirait le plus important phénomène de crue prévu, à l'exclusion de la surélévation due aux vagues	PHE
Niveau (ou cote) de la crête (mNGT)	Cote du plan de la crête du barrage, à l'exclusion des parapets et d'éventuels murs de protection contre le batillage	NCR
Hauteur de retenue normale (m)	Dénivelée entre le niveau normal de la retenue et celui du lit de l'oued	h_{RN}
Hauteur hors sol (m)	Dénivelée entre le niveau de la crête et celui du lit de l'oued	h
Surélévation de crue (m)	Dénivelée entre le niveau des plus hautes eaux et celui de la retenue normal. Ce sur-remplissage représente la charge maximale exercée sur le déversoir en correspondance de la crue de projet.	hL
Revanche	Dénivelée entre le niveau de la crête et le niveau des plus hautes eaux	h_R
Hauteur maximale du barrage(m)	Dénivelée existant entre la cote du plan de crête et celle du point le plus bas de la superficie de fondation (à l'exclusion d'éventuelles sous-structures d'étanchéité)	hm
Tranche morte (m3)	Volume de retenue situé au-dessous du niveau minimal d'exploitation et destiné à l'envasement	VS
Volume utile de la retenue (m3)	Volume d'eau compris entre la cote normale de la retenue et la cote minimale d'exploitation : ce volume comprend la tranche utilisable et celle correspondant aux pertes par évaporation et par infiltration	VU
Volume de laminage	Volume compris entre la cote des plus hautes eaux et la cote normale de la retenue	VL
Volume (ou capacité) totale de retenue (m3)	Volume total d'eau compris entre la cote normale de la retenue et la cote du lit de l'oued	V
Surface ou superficie de la retenue (m2)	Superficie du plan d'eau pour la cote normale de la retenue	S

II.2. Classification des barrages

Parmi les diverses classifications possibles, nous retiendrons les deux suivantes : d'après la fonction et la structure et suivant le type de matériaux constituant la digue, le mode de résistance à la poussée de l'eau et le procédé de construction (Ginocchio, 1959).

II.2.1. Classification des retenues d'après les utilisations diverses de l'eau

D'après les possibilités d'accumulation de la retenue, nous distinguons les barrages d'exhaussement et barrages d'accumulation.

Les barrages qui jouent seulement un rôle d'exhaussement sont principalement ceux des aménagements de basse **chute** ($H_n < 30$ m ; H_n hauteur de chute nette) généralement situés en basse vallée, L'exhaussement est caractérisé par la hauteur de **retenue** maximale, h_m , différence entre la cote du plan d'eau à la retenue normale au droit du barrage et la cote du fond du cours d'eau au point le plus bas de celui-ci dans la section occupée par le barrage.

Les barrages d'accumulation sont ceux des aménagements de moyenne ($30 < H_n < 200$ m) et de grande hauteur ($H_n > 200$ m), généralement situé en haute vallée.

Les barrages d'accumulation peuvent avoir des buts ou utilisations différentes et souvent multiples :

- a- stockage des eaux pour usage unique : eaux potables; Irrigation; Protection contre les crues ; Production d'énergie hydroélectrique
- b- Usages multiples : eau potable ; irrigation ; énergie hydroélectrique et protection contre les crues (SidiSalem)

II.2.2. Classification des retenues d'après la structure

Suivant la structure du barrage, nous pouvons distinguer les barrages fixes et barrages mobiles. Les barrages fixes créent une obstruction pratiquement invariable du lit du cours d'eau sur lequel ils sont construits. Les barrages mobiles, au contraire, comprennent des éléments amovibles (bouchures mobiles) qui permettent de faire varier l'obstruction créée dans le cours d'eau et, par suite, de régler le niveau du plan d'eau en amont en fonction du débit (voir section II-5).

II.2.3 Classification des barrages selon le type de matériaux et le mode de résistance à la poussée de l'eau

Les barrages sont souvent classés sur la base du type de matériaux de construction ou sur la méthode de résistance à la pression de l'eau. Les principaux types de barrages sont :

- Barrages rigides (en matériaux assemblés)
- Barrages poids (gravity dams)
- Barrages voûtes (arch dams)

- Barrages à voûtes multiles (multiple archdams)
- Barrages à contreforts (bouttressdams)
- Barrages en remblais (en matériaux non assemblés) (embankmentdams)
- Barrages en terre (earthdams)
- Barrages en enrochement (rock-fill dams)

Ces différents types de barrages seront étudiés en détail dans la section II-4 et 6 suivantes.

II.2.4 Autres classifications des barrages

Plusieurs autres types de classification des barrages existent, nous présenterons quelques unes dans ce qui suit.

Selon que les matériaux constituant la digue sont liés ou meubles on parle de barrage souples ou barrages rigides. Les barrages souples sont parfois appelés aussi, barrage en remblais « embankment dams ».

Selon le procédé utilisé lors de la construction, on distingue les barrages construits à sec et les barrages construits dans l'eau.

On distingue aussi, les barrages submersibles et les barrages insubmersibles. Les barrages en terre sont de nature insubmersibles, sachant qu'une submersion même à faible débit implique une quasi certitude d'une destruction rapide.

On parle aussi, de barrages provisoires et de barrages définitifs. Les barrages provisoires ou batardeaux « cofferdams », ont une utilité temporaire, ils sont souvent construits pour permettre ou pour faciliter la construction d'ouvrages définitifs. Les barrages définitifs sont destinés à rester en service pour la durée de vie de l'ouvrage qui peut s'étendre à des dizaines ou même à des centaines d'années moyennant un entretien convenable.

Les barrages de hauteur inférieure à 100 m, sont appelés barrages ordinaires, les autres sont appelés barrages de grandes hauteurs (le barrage d'Aswan en Egypte, par exemple). Selon la nature de matériaux de la digue et des terrains d'assise et selon la hauteur de l'ouvrage on distingue 4 classes (voir Tableau II.2) :

Tableau II.2 : Classification des barrages selon la nature de matériaux de la digue et des terrains d'assise et la hauteur de l'ouvrage

Ouvrage de retenue	Terrains d'assise	Hauteur de l'ouvrage pour la classe			
		IV	III	II	I
Barrages en terre et en enrochement	* Rocheux	25	25-70	70-	100
	* Sableux, de grosses pierres, argileux compacts	15	15-35	100 35-75	75
	* Argileux bien saturé en état plastique	15	15-25	25-50	50
Barrages en béton, béton armé et ouvrages annexes	* Rocheux	25	25-60	60-	100
	* Sableux, de grosses pierres, argileux compacts	10	10-25	100 25-50	50
	* Argileux bien saturé en état plastique	10	10-20	20-25	25

II.3. Procédure de conception

Lors de la conception d'un ouvrage hydraulique, on peut distinguer trois phases bien caractérisées :

Première phase : études préliminaires ou Avant Projet Sommaire (APS)

Elle concerne les **reconnaisances** et les études générales de la zone à développer en vue:

- d'établir l'inventaire des réalisations susceptibles de satisfaire des besoins soit déjà exprimés soit répertoriés dans la zone
- d'apprécier l'intérêt économique de la réalisation de ces aménagements

Elle comprend les étapes suivantes:

- collecte des données disponibles : documents cartographiques, données climatiques, renseignements géologiques, données relatives aux pratiques agricoles et aux besoins d'eaux.
- inventaires des sites potentiels et Critères de choix : topographiques, géologique et géotechnique, hydrologique, proximité des lieux d'utilisation, critères économiques (E = Vol. Utile de la retenue/Volume de la digue), reconnaissance des lieux, **reconnaissance** géologique et géotechnique, examen des sites topographique rapide, reconnaissance du périmètre irrigable et/ou des agglomérations rurales

Les études préliminaires à réaliser sont :

1. Etude topographique

- 2- Etude hydrologique
- 3- Etude géologique et géotechnique
- 4- Evaluation des besoins
- 5- Evaluation des caractéristiques de l'aménagement 6- Choix des sites
- 6- Schémas des aménagements - Estimations des coûts 8- Enquête sanitaire et sur le milieu
- 7- Programme de réalisation
- 8- Etablissement du rapport desynthèse

Deuxième phase : étude d'Avant Projet Détaillé (APD)

Elle concerne les études des variantes présélectionnées lors de la phase préliminaire. Il s'agit des études d'avant-projet détaillé qui permettront la réalisation des aménagements.

Les études d'avant projet détaillé comprennent :

- 1- Levés et études topographiques
- 2- Etudes hydrologiques
- 3- Etudes géologiques et géotechniques
- 4- Evaluation des besoins en eau
- 5- Etude de régularisation
- 6- Etudes d'impacts du projet
- 7- Types, caractéristiques et dimensionnements des ouvrages
- 8- Les prescriptions techniques
- 9- Avant-métré et détail estimatif

Troisième phase : études de réalisation des ouvrages (dossier d'exécution)

Elle concerne les conditions d'organisation, les prescriptions techniques pour une bonne exécution et les contrôles qui doivent être mis en œuvre pendant la construction des ouvrages.

Ces études intéressent les aspects suivants :

- Moyens pour la réalisation du projet (engins, matériaux, matières consommables, personnel)
- Organisation du chantier
- Exécution des travaux (séquence des opérations, principaux travaux, contrôle des travaux)

II.4. Choix du site et des caractéristiques d'un barrage

Le choix du site et des caractéristiques géométriques (hauteur et formes) d'un barrage doit être effectué en fonction des conditions suivantes :

- Conditions topographiques
- Conditions géologiques

- Conditions hydrologiques
- Conditions relatives à la géographie humaine

Le choix du type d'ouvrage dépend également de ces différents facteurs ainsi que des conditions économiques relatives à l'exécution des travaux.

II.4.1. Conditions relatives à la topographie

La recherche d'un emplacement de barrage est précédée des opérations suivantes :

- Etablissement d'une carte à grande échelle avec courbes de niveau dressée, en général, par procédé photogrammétrique
- Recherche de verrous (ou gorges) et de cuvette sur cette carte qui, pour un barrage fixe, doivent remplir les conditions suivantes:
 - a) largeur du verrou la plus faible possible pour réduire le volume de la digue par mètre de dénivellation
 - b) Capacité la plus grande possible pour une hauteur donnée de la cuvette située en amont du barrage d'accumulation.

La qualité d'un site de barrage d'accumulation peut être caractérisée par le volume d'eau accumulé par m³ de digue (m³ de béton du barrage), ou encore par le nombre de KWh accumulés par m³ de digue.

II.4.2. Conditions géologiques

Les roches et les sols de la zone de fondation de l'ouvrage et de la cuvette doivent présenter des caractéristiques satisfaisantes en ce qui concerne :

- a- la stabilité du barrage
- b- l'étanchéité de la retenue

II.4.2.1. La stabilité du barrage

En ce qui concerne la stabilité de l'ouvrage, le terrain de fondation doit présenter les qualités essentielles suivantes:

- faible degré de broyage et d'altération
- faible compressibilité
- grande résistance à l'écrasement

La recherche de ces caractéristiques est réalisée grâce aux moyens suivants :

- a) Travaux de reconnaissance
- b) Procédés géophysiques

Travaux de reconnaissance

Les travaux de reconnaissance ont pour but de reconnaître la topographie du rocher en place, la nature du terrain, sa structure, son degré d'altération (faible, diaclases) et de déterminer sa

résistance mécanique.

Les différents procédés utilisés sont les suivants :

- Décapage de la zone d'implantation de l'ouvrage
- Percement de galerie et de puits dans les versants
- Sondage aux rails : enfoncement de barre métallique (composée par exemple, de rails éclissés) jusqu'au contact du rocher en place (bed-rock)
- Sondage mécanique vertical ou rayonnant (Figure II.2) : carottage (échantillon cylindrique de roches) à des profondeurs sur plusieurs dizaines de mètres.

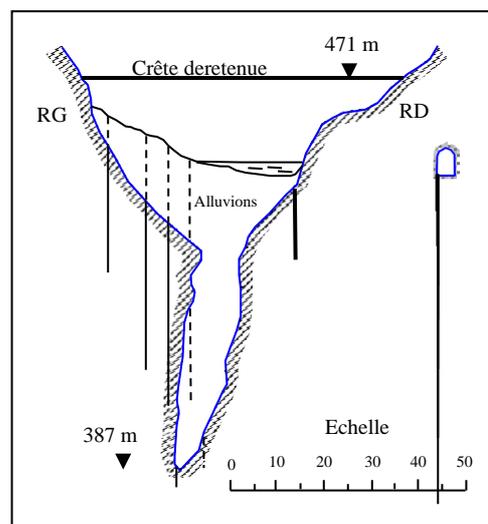


Figure II.2: Sondage mécanique vertical rayonnant (Ginocchio, 1959)

La durée des campagnes de reconnaissance est quelquefois très longue : des années voir même des dizaines d'années (ex. Barrage Serre-Ponçon 1913-1947 pour 6500 m de perforation).

Procédés géophysiques

Mesures de certaines caractéristiques physiques des rochers et des sols telles que : vitesse du son et résistance ohmique à partir desquelles on peut déterminer les grandeurs caractérisant la déformation et la résistance mécanique des roches de fondations. Rappelons que le module d'élasticité E d'un matériau caractérise sa compressibilité, c'est-à-dire sa déformation sous l'action d'une contrainte ; sa valeur est d'autant plus grande que le matériau est moins compressible et la roche de fondation est ainsi d'autant plus satisfaisante. Suivant la vitesse d'application des contraintes, nous distinguons le module d'élasticité statique et dynamique:

1) Module statique E_s : peut être mesuré par deux méthodes:

- formation d'une cavité : on crée une cavité cylindrique de diamètre d dans la roche ; on introduit de l'eau sous pression dans cette cavité et on mesure la variation Δd du diamètre du cylindre produite par une pression p :

$$\Delta d = \frac{pd}{E_s} (1 + \mu) \quad (1)$$

- Méthode de poinçonnement : elle consiste à charger le terrain sur une surface circulaire au moyen d'un vérin et mesurer les enfoncements sur les bords et au centre.

Les valeurs de E_s varient entre $25\ 000 < E_s < 300\ 000\ \text{Kg/cm}^2$ (respectivement pour schistes verts et schistes cristallins de bonne qualité).

2) Module dynamique E_d : mesuré par la méthode sismique des vitesses de propagation d'ondes de pression longitudinales V_l et transversales V_t produites par une explosion. Ces vitesses permettent le calcul de E_d et μ , le coefficient de Poisson.

$$V_l = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad V_t = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}} \quad (2)$$

ρ étant la masse volumique de la roche

La mesure du temps de propagation est réalisée au moyen de sismographes. Le module E_d est en général, supérieur au module statique E_s . La méthode sismique permet également de déterminer l'épaisseur d'une couche rocheuses surmontant une couche de nature différente par mesure des temps de propagation (méthode par réflexion, méthodes par réflexion).

II.4.2.2. Etanchéité de la retenue

L'étanchéité d'une retenue dépend de la perméabilité des terrains constituant le sol de fondation du barrage et la cuvette : ces terrains sont en effet soumis à la pression correspondant à la hauteur d'eau dans la retenue du barrage et peuvent être traversés par des débits importants.

Définitions

La perméabilité d'un milieu poreux mesure son aptitude à laisser s'écouler les fluides en son sein. L'eau chemine dans les pores du milieu sous l'effet de la pression : le débit à travers une section donnée est d'autant plus faible que les frottements sont plus grands (pores de dimension plus petites). Considérons un milieu poreux homogène et isotrope à travers lequel s'écoule un liquide à débit constant Q (Figure II.3).

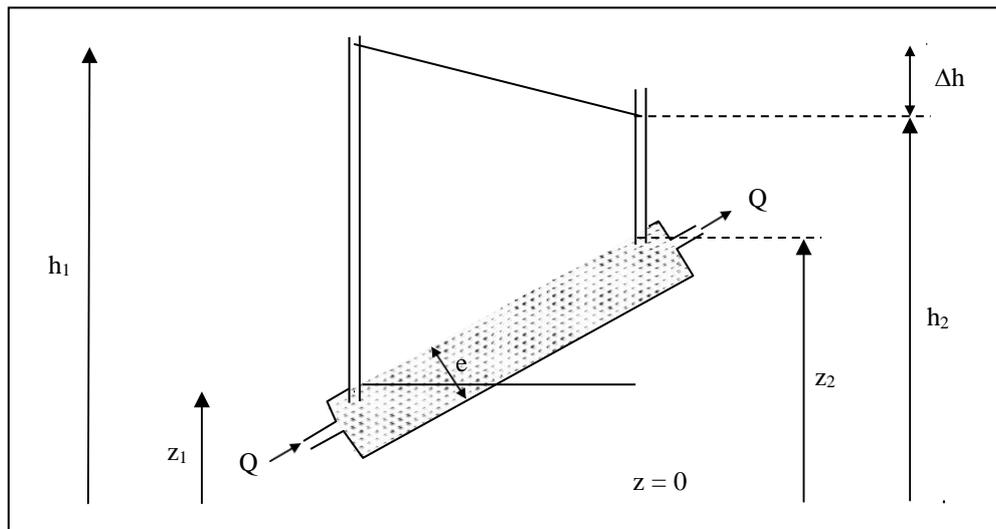


Figure II.3: Expérience de Darcy

La loi de Darcy permet d'exprimer la vitesse moyenne de l'écoulement U à travers un milieu poreux par la relation :

$$U = KI = -K \frac{dh}{dl} \quad (3)$$

Avec, K : coefficient de perméabilité ; les ordres de grandeur du coefficient de perméabilité K sont les suivants : K sable siliceux 10^{-3} à 10^{-4} m/s ; K argile 10^{-7} m/s.; I gradient de pression (perte de charge/longueur d'infiltration) ; h est la charge piézométrique ($h = z + P/\rho g$).

Cette loi exprime que la vitesse de percolation est positive dans la direction des charges décroissantes. Elle permet de déterminer la forme de la surface libre de la nappe d'eau infiltrée dans un massif (surface de saturation), celle des lignes de courant et le débit d'infiltration à travers le massif. L'analogie de la forme de la loi de Darcy avec la loi d'Ohm permet d'utiliser des modèles en analogie électrique pour tracer les lignes de courant et les lignes équipotentiels. Avec les moyens informatiques modernes, ces lignes peuvent être déterminées directement par la résolution de l'équation de Laplace des écoulements potentiels plans.

Méthodes de mesure de la perméabilité

Les méthodes de mesure du coefficient K diffèrent suivant que le terrain est formé de roches consistantes ou de terrains alluvionnaires.

b1) Roches consistantes

La perméabilité est, en général, mesurée sur place par l'essai « Lugeon » ; Mesure sur site par injection d'eau sous pression constante et mesure du débit absorbé par unité de longueur de forage.

b2) Terrains alluvionnaires

La perméabilité est mesurée par des essais en laboratoire ou des essais sur place :

* Essais en laboratoire : Une carotte de sol de section S est placée dans un tuyau sous pression constante et on mesure le débit Q à travers celle-ci pour une perte de charge linéaire I. La loi de Darcy donne :

$$K = \frac{Q}{SI} \quad (4)$$

* Essais sur site : indispensable pour les matériaux constitués de grains pas très fins, car un échantillon de faibles dimensions n'est pas suffisamment représentatif. Méthode de rabattement de la nappe : pompage et détermination de la forme de la surface libre de la nappe rabattue au moyen de tubes piézométriques (Figures II.4 etII.5).

- Nappe libre (la surface libre de la nappe est à la pression atmosphérique et l'aquifère n'est pas saturé sur toute son épaisseur):

En supposant que toutes les vitesses horizontales dans une tranche verticale de la nappe sont égales (hypothèse de Dupuit) et que les vitesses verticales sont négligeables, le débit Q pour un écoulement permanent, peut être calculer par (Figure II.4) :

$$Q = \frac{\Pi K (H^2 - h^2)}{\log (D / d)} \quad (5)$$

Avec, Q : débit ; K : coefficient de perméabilité ; H : hauteur totale de l'eau à partir du fond du puit jusqu'à la surface libre sans influence du pompage ; h = H – s avec s le rabattement de la nappe ; D : diamètre du cylindre d'action ; d : diamètre du puit.

Cette formule qui n'est valable que dans les zones assez éloignée de la nappe permet de déterminer la perméabilité du milieu poreux en mesurant le débit, H(D), h et d.

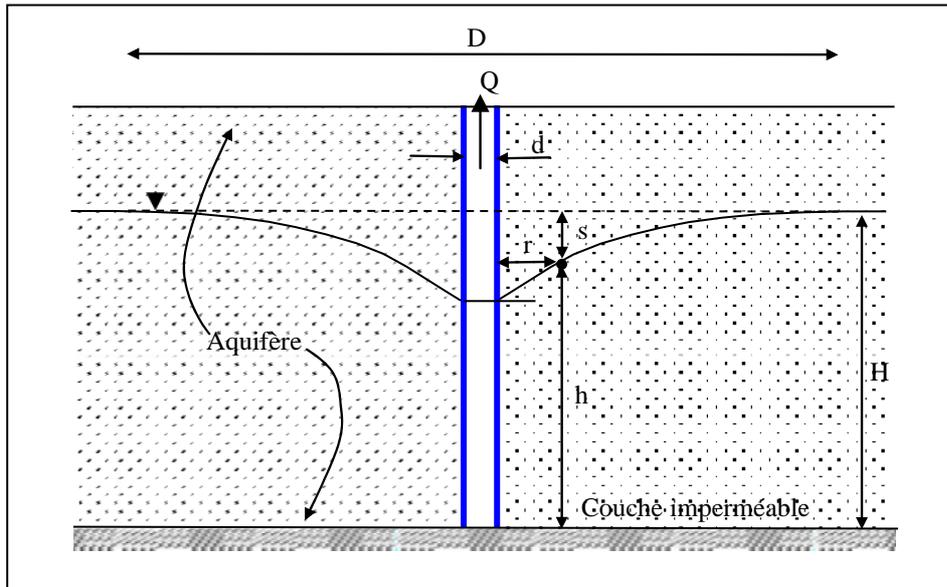


Figure II.4: Schéma de calcul du débit d'une nappe libre

- Nappe artésienne (C'est une nappe captive, la surface libre est à une pression supérieure à la pression atmosphérique, la surface piézométrique est au-dessus de la surface topographique, Figure II.5) : Le débit pour un écoulement permanent, à partir d'un puits artésien est donné par:

$$Q = \frac{2 \pi K e (H - h)}{\log(D / d)} \quad (6)$$

Avec, e est l'épaisseur de l'aquifère confiné.

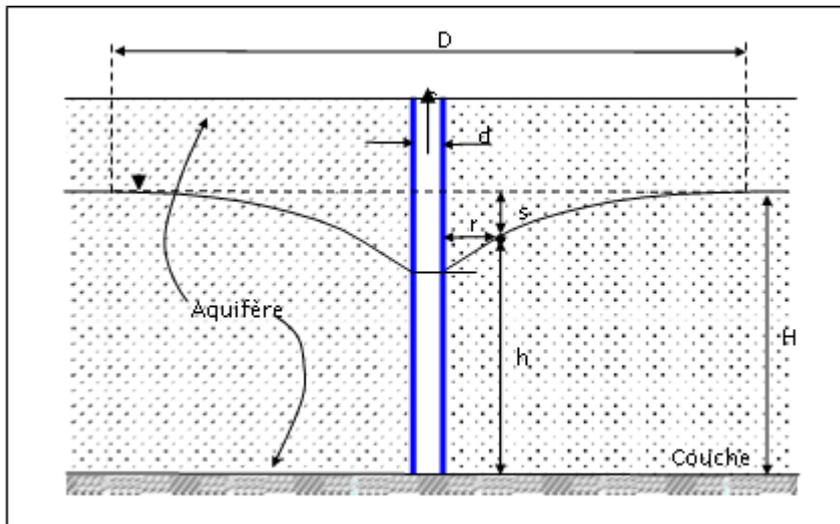


Figure II.5: Schéma de calcul du débit d'une nappe artésienne

Etude géologique

Vise la détermination des possibilités de fuite : à l'aval du barrage, dans la vallée barrée ou dans une autre vallée de niveau inférieur. L'importance des fuites dépend de la nature géologique des terrains traversés. Les terrains peuvent être :

* Perméables en petit (terrains alluvionnaires) : les résurgences se produisent, en général, à une distance suffisamment grande à l'aval du barrage pour que le débit de fuite soit acceptable. Les fuites sont importantes dans le cas d'un lit fossile, lits anciens recouverts par des alluvions.

* Perméables en grand : roches solubles

II.4.3. Conditions hydrologiques

- a) Superficie du bassin versant : l'alimentation du réservoir doit assurer son remplissage en année hydrologique moyenne
- b) Débit solide : important pour fixer la capacité utile de la retenue et la cote de la prise d'eau.

II.4.4. Conditions relatives à la géographie humaine

- a) Retenue normale et retenue exceptionnelle : (Q_{moyen} et $Q_{cruemax}$) : courbes de remous correspondantes, habitations, routes, voies ferrées, cultures, sites protégés, ouvrages d'art, irrigation, pêche,...
- b) Agglomération et terres cultivées : expropriation/déplacements
- c) Voies de communication : déviations routes, voies ferrées, conduites...
- d) Navigation intérieure : à maintenir,
- e) Débit réservé – réservoir de compensation : Q_{min} , échelles à poissons

II.5. Travaux d'ouvrages hydrotechniques

II.5.1. Sujétions communes

Les actions préliminaires à entreprendre comprennent :

- 1- Approvisionnement des matériaux : assurer des cadences de production et de mise en place atteignant plusieurs milliers de m^3 par jour pour un barrage en béton, plusieurs dizaines de milliers de m^3 par jour pour une digue en terre.
- 2- Installation du matériel de chantier : le plus proche possible de l'ouvrage pour réduire le plus possible les dépenses de transport et de mise en place de matériaux
- 3- Logement du personnel : cités d'habitation et constructions collectives (écoles, services administratifs, service sanitaires)

II.5.2. Dispositions constructives

Les dispositions constructives communes aux différents types d'ouvrages concernent :

- les procédés de construction en lit de rivière
- les procédés d'étanchement et de consolidation des fondations

II.5.2.1 Procédés de construction en lit de rivière

Le premier stade dans la construction d'un barrage consiste essentiellement à réaliser une obstruction (ou coupure) du lit du cours d'eau en vue d'assurer la réalisation des travaux de fondations de l'ouvrage. Cette obstruction doit satisfaire les critères suivants:

- en cas de crue, la surélévation du plan d'eau en amont ne doit pas causer des submersions supérieures à celles en absence de l'ouvrage et essentiellement dans les zones habitées ou industrielles,
- la vitesse de l'eau sur le fond ne doit pas provoquer des affouillements du lit
- si le cours d'eau est navigable, la vitesse de l'eau dans les canaux de navigation ne doit pas dépasser une certaine valeur maximale.

Pour remplir ces conditions, deux méthodes de coupure principales sont utilisées :

- Méthode des empiétements successifs sur le lit (la coupure du cours d'eau constitue la phase finale)
- Méthode de la dérivation provisoire (la coupure du cours d'eau est réalisée à la phase initiale)

Méthode des empiétements successifs sur le lit

Cette méthode est utilisée lorsque le lit est assez large en vue de réduire la vitesse de l'écoulement. L'ouvrage est construit en obstruant successivement certaines parties du lit du cours d'eau:

- soit par des enceintes de batardeaux, souvent métallique, telle que (ABCD) et (EFGH) à l'intérieur desquelles, l'ouvrage est construit en eau morte ou par épaissements (Figure II.6).
- soit par la construction de l'ouvrage en eau courante par fondation à l'air comprimé. La fondation à l'air comprimé est réalisée en général par caissons perdus qui sont foncés successivement pour que l'obstruction du lit soit la plus faible possible.

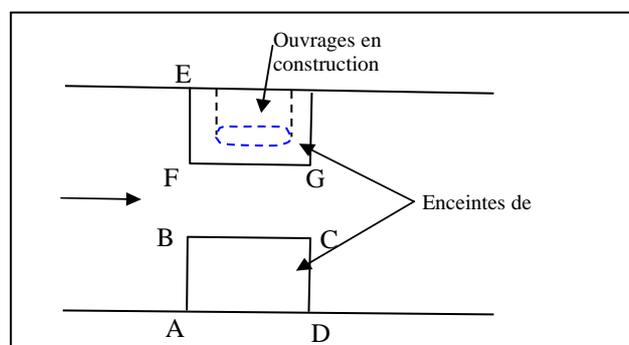


Figure II.6: Construction par empiétements successifs sur le lit

(Ginocchio, 1959)

Chapitre II: OUVRAGES DE RETENUES

La figure II.7 résume les quatre phases essentielles de construction du barrage Rochemaure sur le Rhône.

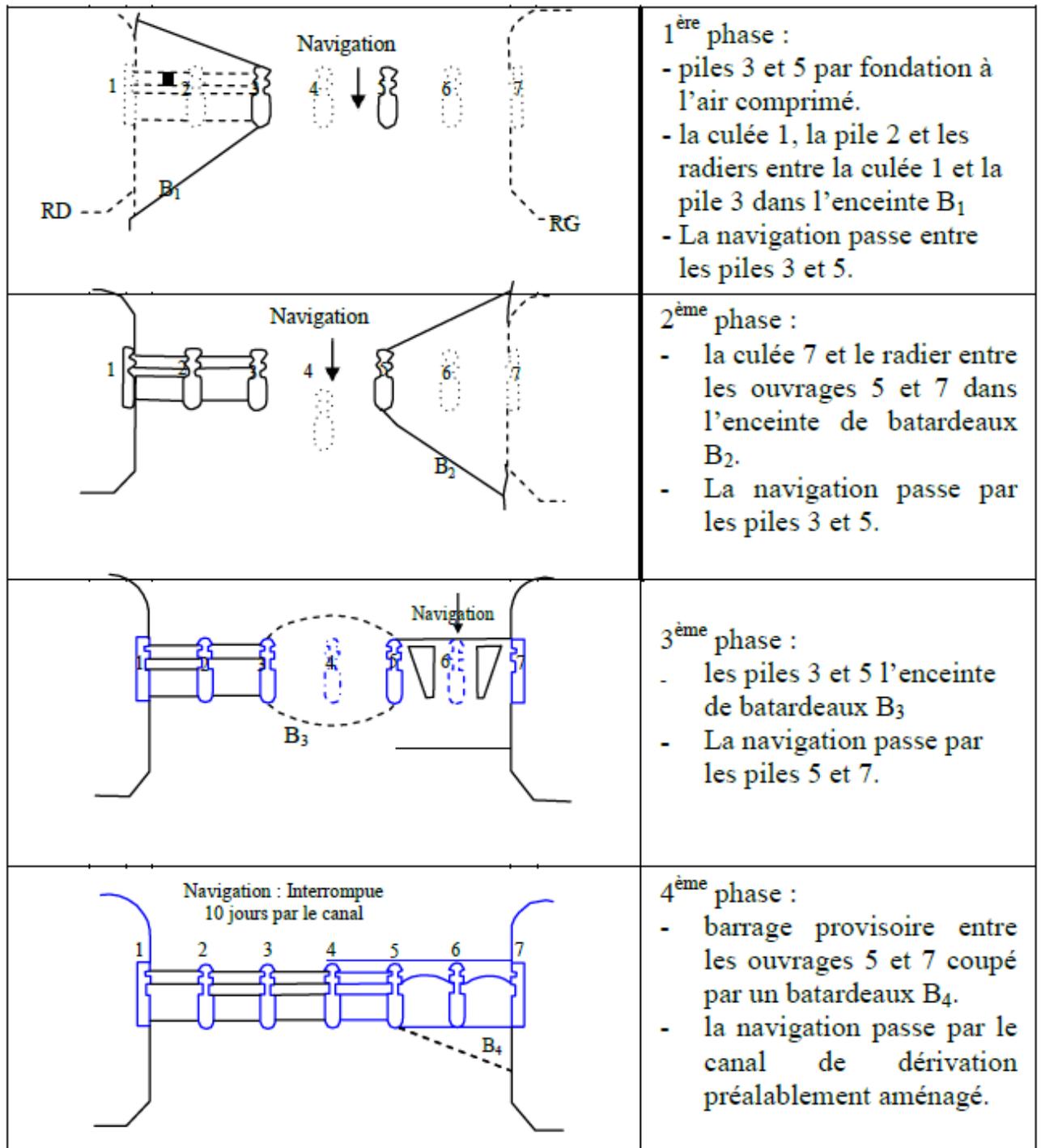


Figure II.7: Phases de construction du barrage de Rochemaure sur le Rhône
(Ginocchio, 1959)

Méthode de la dérivation provisoire

Elle est employée notamment lorsque le lit est relativement étroit et ne peut, être obstrué partiellement par une enceinte de batardeaux ou par un caisson ; c'est le cas aussi des cours d'eau avec fond rocheux rendant difficile l'enfoncement de palplanches.

La zone dans laquelle le barrage sera construit est mis à sec par des batardeaux amont et aval et les eaux stockés derrière le batardeau amont sont alors dériver dans un canal à ciel ouvert ou une galerie (Figure II.8). Ce canal peut être transformé après la construction du canal en ouvrage de vidange de fond ou de dévasement.

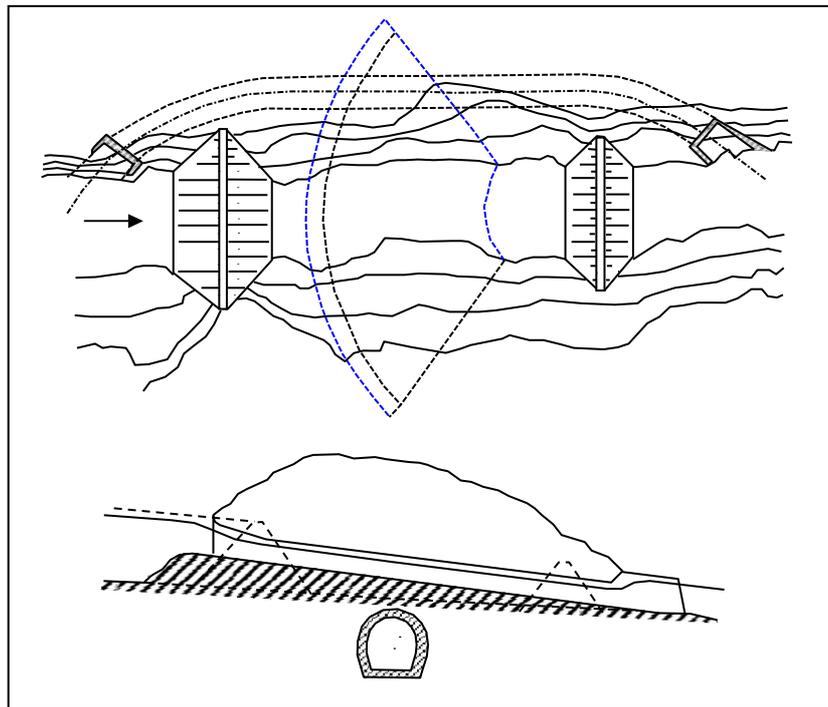


Figure II.8: Méthode des dérivations provisoires (Ginocchio, 1959)

Procédés de coupure d'un cours d'eau

La coupure d'un cours d'eau est réalisée par l'un des procédés ci-après :

- a- Coupure par pierres lancées : la construction peut être réalisée soit à l'avancement (en partant de l'une des berges) ou par couches horizontales successives (les deux berges simultanément)
- b- En béton ou en gabion par procédés classiques (lorsque le débit du cours d'eau descend à des valeurs très faibles, de l'ordre de $1\text{m}^3/\text{s}$)
- c- Par « bloc basculé » qui consiste à construire sur une rive un bloc de béton dont une face reproduit le profil en travers du lit de la rivière et à provoquer le basculement de ce bloc. C'est le cas du barraged'Assouan.

II.5.2.2. Etanchéité et consolidation des fondations

La fondation d'un ouvrage devrait présenter la plus grande étanchéité possible. Souvent, il est nécessaire de procéder à l'étanchement des roches et sols de fondations par un traitement particulier suivant la nature de la fondation.

a) Fondations sur roches consistantes

Le traitement consiste à réaliser des écrans étanches en injectant dans la roche un coulis constitué de produits susceptibles d'obturer les fissures. Les produits utilisés : ciment, argile, silicate de soude, aluminat de soude ou produits bitumineux. La mise en œuvre se fait par injection à l'air comprimé ou par pompage par des forages de 5 à 10 cm de diamètre et sous une pression de l'ordre de 20 bars à raison de 50 à 150 Kg/ml de forage. Les écrans réalisés peuvent comprendre:

- Un voile principal qui prolonge vers le bas le parement amont de l'ouvrage et sa profondeur de l'ordre du tiers de celle du barrage
- Voile au large sur la rive gauche et droite qui prolonge le voile principal au-delà des appuis du barrage ; son but est de limiter les pertes d'eau par contournement,
- Injection de liaison permettant d'assurer une bonne liaison entre la base du barrage et le rocher et réaliser l'étanchéité de l'ouvrage et du voile principal.

b) Fondations sur terrain meubles

Les travaux d'étanchéité ont pour but d'empêcher la percolation qui peut compromettre la stabilité de l'ouvrage et d'entraîner des pertes d'eau importantes. Les ouvrages réalisés sont des écrans imperméables verticaux descendu ou non jusqu'au rocher. Ces écrans peuvent être réalisés par l'un des procédés suivants:

- Digues en terre : écrans imperméables verticaux arrivant ou pas au rochet
- Murs en béton
- Rideaux de palplanches métalliques
- Rideaux de pieux forcés
- Rideaux d'injection

II.6. Actions et remèdes des ouvrages hydrauliques

Nous avons vu qu'un barrage est un ouvrage qui retient les eaux contre une de ses faces à un niveau supérieur à celui qui règne sur l'autre face. Si un barrage exerce une action sur le niveau des eaux, ce niveau exerce une action réciproque sur le barrage.

II.6.1. Actions

Ces actions peuvent compromettre la fonction du barrage dans le stockage des eaux et peuvent conduire à la destruction du barrage à une échéance plus ou moins rapide.

Les actions de l'eau et leurs effets sont consignées dans le tableau II.3. L'examen de la dernière colonne de ce tableau montre que les trois accidents à redouter sont :

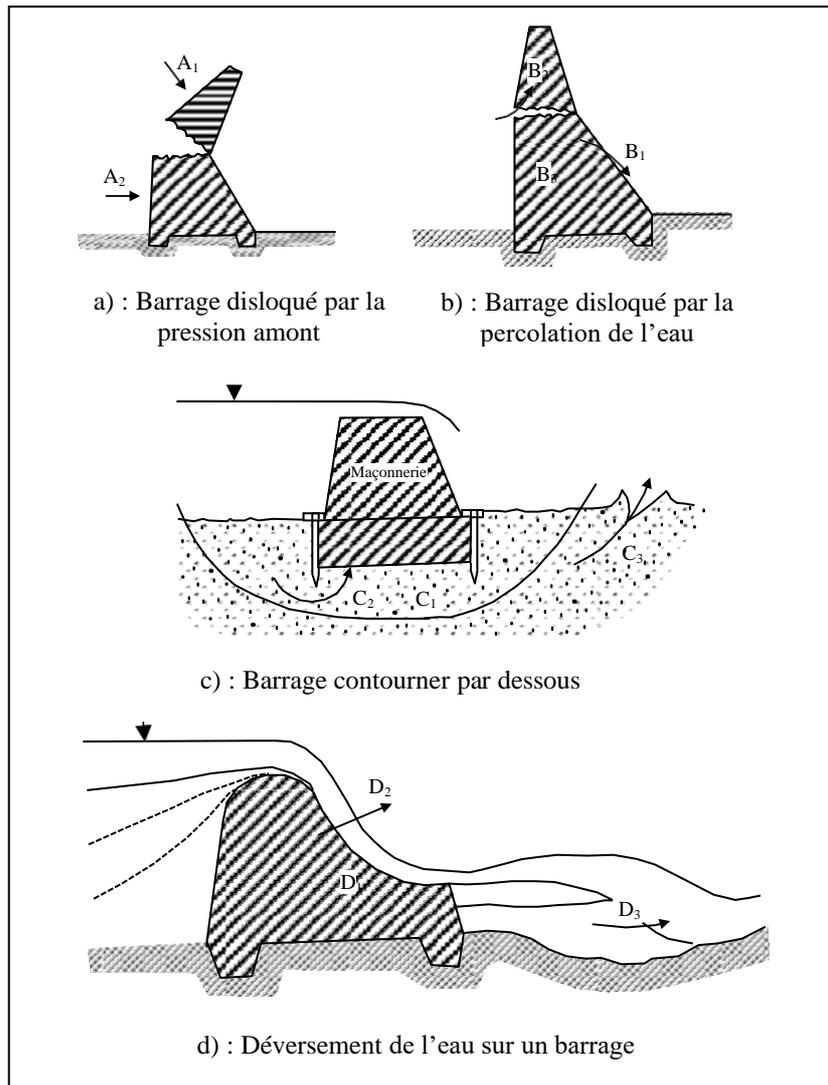
- 1- Dislocation ou la destruction du corps ou du radier du barrage (Figures II.9 a et b)
- 2- Pertes importantes d'eau empêchant le barrage de remplir sa fonction qui est de retenir les eaux (Figure II.9c)
- 3- Déplacement d'ensemble d'une portion importante du corps ou radier du barrage par basculement ou par glissement (Figure II.9d)

Les pertes d'eau sont toujours dommageables : dans un barrage pour des usages utiles, toute perte correspond à un manque à gagner ; dans un batardeau ou une digue de protection contre les inondations, le pompage des fuites risque d'entraîner des dépenses supplémentaires importantes. Suivant la forme d'un ouvrage particulier, les actions A, B, C et D énumérées dans le Tableau II.3 constitueront pour lui des dangers plus ou moins sérieux.

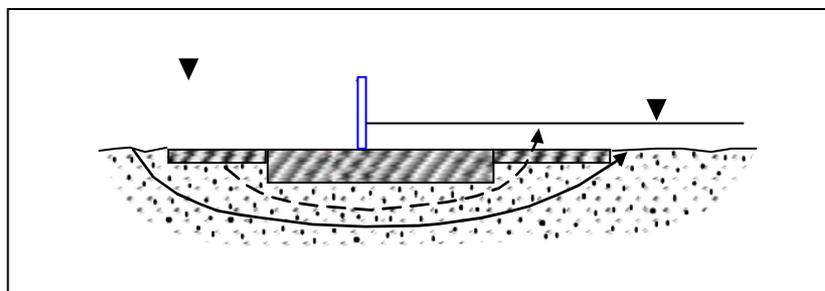
II-6.2. Remèdes

Les remèdes indiqués dans la troisième colonne du tableau II.4, intéressent :

- 1- Un choix judicieux des dimensions et des formes du barrage permet de s'opposer à sa dislocation et à son déplacement d'ensemble.
- 2- La construction du barrage avec des matériaux appropriés peut s'opposer à sa destruction, à son déplacement d'ensemble, et aux pertes d'eau.
- 3- La liaison du barrage avec le sol avoisinant et l'aménagement de celui-ci permet de lutter contre la pénétration de l'eau dans le terrain avoisinant au barrage, et aussi contre les effets destructeurs de l'eau qui franchit le barrage, ces deux actions étant répertoriées sous les lettres C et D dans le Tableau II.3. La Figure II.9 montre comment la présence d'un écran d'étanchéité horizontal peut allonger le parcours des particules fluides (la flèche en pointillé correspond au cas sans écran).
- 4- Accrochage dans le sol : Cet accrochage peut être réalisé au moyen d'ancrages : fer ronds ou câbles d'acier travaillant à la traction à condition que le sol de fondation est un rochet compact.



**Figure II.9: Actions de l'eau sur les barrages et leurs abords
(d'après Aubert, 1949)**



**Figures II.10 : Allongement du contournement sous un barrage
(d'après Aubert, 1949)**

Tableau II.3: Actions de l'eau classées d'après leur origine (Aubert, 1949)

Origine des actions de l'eau		Mécanisme des actions de l'eau	Conséquences dommageables pour la fonction du barrage et pour sa conservation
Actions statiques	A. Pression exercée sur la surface du barrage (Figure II.9 a)	Les pressions exercées sur les faces amont et aval engendrent des efforts dans les diverses parties de l'ouvrage	A ₁ Pressions exercées par l'eau sur les surfaces de maçonnerie avec lesquelles elle est normalement en contact, pouvant entraîner la dislocation du barrage ou le déplacement d'ensemble d'une portion importante de celui-ci.
	B. Pénétration dans le corps ou le radier du barrage (Figure II.9b)	Du fait des pressions exercées sur la surface du barrage, l'eau tend à s'infiltrer dans les maçonneries en cheminant soit dans les pores de celles-ci, soit dans les fissures (qui peuvent être préexistantes ou résulter du cheminement lui-même)	B ₁ Perte d'eau B ₂ Efforts dus à la pression statique d'amont à l'intérieur des maçonneries et pouvant entraîner la dislocation B ₃ Délavage des maçonneries amenant leur appauvrissement en liant (érosions internes des maçonneries) et pouvant entraîner leur destruction, par combinaison avec d'autres actions.
	C. Pénétration dans le terraina voisinant (Figure II.9 c)	Tendance au contournement du barrage, au travers des terrains environnants, soit par-dessous le corps ou le radier du barrage, soit par derrière ses ancrages latéraux dans le terrain en place.	C ₁ Perte d'eau C ₂ Pressions exercées par l'eau sur certaines faces du barrage en contact avec le sol, par suite de l'infiltration et du cheminement de l'eau dans le terrain. Ces pressions peuvent contribuer à la dislocation du barrage ou à son déplacement d'ensemble. C ₃ Délavage du sol avoisinant par entraînement progressif de matériaux (érosion interne), avec comme conséquence ultime : - soit une perte d'eau telle que le barrage ne remplit plus sa fonction - soit la destruction du barrage par dislocation ou déplacement d'ensemble, par suite de la disparition partielle du terrain servant d'appui aux maçonneries.
Actions dynamiques	D. Franchissement de l'obstacle (Figure II.9 d)	Si le bief amont est alimenté en eau, l'arrêt de l'écoulement provoqué par le barrage entraîne une accumulation sur sa face amont. Le niveau des eaux s'élevant progressivement, elles finissent par s'échapper soit en submergeant la crête du barrage soit au travers d'orifice prévus et aménagés à cet effet. Un écoulement d'eau se produit et entraîne un certain nombre d'actions dynamiques.	D ₁ Frottement sur les maçonneries de l'eau et des matériaux entraînés par elle, exerçant une usure des maçonneries qui peut se prolonger jusqu'à la destruction du barrage D ₂ Efforts exercés par les masses d'eau en mouvement au contact du barrage, tels que pressions tant statique que dynamiques, dépressions entraînant des effets de succion ou même des vibrations, ces diverses actions pouvant amener la dislocation ou le déplacement du barrage. D ₃ Actions du courant d'eau sur le sol en amont et en aval ou sur les cotés du barrage pouvant provoquer un entraînement de matériaux (érosion superficielle) susceptible de se traduire: - soit par le contournement du barrage (perte d'eau), - soit par la destruction de celui-ci (dislocation ou déplacement d'ensemble) par disparition partielle du terrain d'appui.

Tableau II.4: Actions de l'eau classées d'après leurs conséquences avec l'indication des remèdes à employer (Aubert, 1949)

Conséquences dommageables	Causes qui les provoquent	Remèdes à employer pour résister aux diverses causes de destruction
Dislocation ou destruction du corps ou du radier du barrage (Figures II.9 et II.10)	<p>1- Pressions exercées par l'eau sur les surfaces de maçonnerie avec lesquelles elle est normalement en contact(A₁).</p> <p>2- Pressions qui, du fait de l'infiltration de l'eau à travers le terrain, viennent s'exercer sur certaines surfaces de maçonnerie en contact avec celui-ci(C₂).</p> <p>3- Pressions qui s'établissent à l'intérieur des maçonneries du fait de l'infiltration des eaux d'amont(B₂).</p> <p>4- Disparition par érosion (interne ou externe) d'une partie du terrain d'appui, ce qui engendre des efforts de cisaillement et de flexion (C₃ etD₃).</p> <p>5- Efforts exercés par les masses d'eau en mouvement en contact du barrage(D₂).</p> <p>6- Approvisionnement en liant, ce qui réduit la résistance des maçonneries aux divers efforts qu'elles supportent(B₃)</p> <p>7- Usure superficielle des maçonneries due aux frottements, ce qui réduit leur résistance dans des conditionsanalogues (D₁)</p>	<p>Dimensions et formes appropriées (A₁, C₂, B₂, C₃, D₃, D₂, B₃ et D₁)</p> <p>Armatures métalliques (A₁ et B₂)</p> <p>Diminution de la porosité du barrage (B₂ et B₃)</p> <p>Amélioration de la résistance à l'usure des maçonneries ou exécution d'un revêtement protecteur (D₁)</p> <p>Exécution sur le sol ou dans le sol d'un rideau étanche relié au barrage (C₂, C₃ et D₃)</p> <p>Exécution d'un revêtement protecteur du sol (C₃ et D₃)</p>
Déplacement d'ensemble par basculement ou glissement (Figure II.9)	<p>1- Pressions exercées par l'eau sur les surfaces de maçonnerie avec laquelle elle est normalement en contact(A₁)</p> <p>2- Pressions qui, du fait l'infiltration de l'eau à travers le terrain, viennent s'exercer sur certaines surfaces de maçonnerie en contact avec celui-ci (C₂)</p> <p>3- Disparition par érosion (interne ou externe) d'une partie du terrain d'appui, ce qui provoque la suppressions de certaines pressions (poussées en butées) ou de certains frottements favorables à la stabilité (C₃ ouD₃)</p> <p>4- Efforts exercés par les masses d'eau en mouvement au contact du barrage (D₂)</p>	<p>Dimensions et formes appropriées (A₁, C₂, C₃, D₃ et D₂)</p> <p>Amélioration du poids spécifique des maçonneries (A₁ et D₂)</p> <p>Ancrages travaillant à la traction contre le danger de basculement et de glissement (A₁, C₂, C₃, D₃ etD₂)</p> <p>Ancrages travaillant au cisaillement contre le danger de glissement (A₁, C₂, C₃, D₃ et D₂)</p> <p>Exécution sur le sol ou dans le sol d'un rideau étanche relié au barrage (C₂, C₃ et D₃)</p> <p>Exécution d'un revêtement protecteur du sol (C₂ et D₃)</p>
Perte d'eau (Figures II.9 et II.10)	<p>1- Infiltration à travers le corps ou le radier du barrage(B₁)</p> <p>2- Infiltration à travers le sol avoisinant (C₁)</p> <p>3- Déchaussement ou contournement du barrage à la suite d'une érosion interne ou externe (C₃ etD₃)</p>	<p>Dimensions et formes appropriées (B₁, C₁, C₃ et D₃)</p> <p>Diminution de la porosité du barrage (B₁)</p> <p>Exécution sur le sol ou dans le sol d'un rideau étanche relié au barrage (C₁, C₃ et D₃)</p> <p>Exécution d'un revêtement protecteur du sol (C₁, C₃ et D₃)</p>

CHAPITRE III : BARRAGES COLLINAIRES

III.1 Définition, objectifs et justifications

Les barrages collinaires sont des petits barrages destinés généralement à améliorer une agriculture existante par l'irrigation de petits périmètres (quelques dizaines d'hectares) que les grands barrages ne peuvent atteindre. Ces ouvrages sont caractérisés par :

- hauteur de retenue du barrage < 15 m, à ne pas dépasser que très exceptionnellement
- capacité approximative de la retenue de $50\,000\text{ m}^3$ à 1 million m^3 .
- Rapport $S_{bv}/S_{lac} < 20$ pour les grands barrages collinaires et < 50 pour les petits.
- Caractéristiques mécaniques des sols de fondation acceptables, pour assurer la sécurité de l'ouvrage.
- Absence de problèmes de fondation qui nécessitent des traitements particuliers ou de problèmes particuliers d'imperméabilité du réservoir

Les barrages collinaires ont les avantages suivants :

- Présentent des investissements légers en comparaison avec les grands barrages et induisent ainsi des intérêts intercalaires moins importants.
- Ils entrent en service immédiatement après leur achèvement
- Ils sont d'une conception très simple qui permet une formation aisée des jeunes cadres.
- Ils permettent de faire des économies endeuves
- Création des pôles d'activité proches des populations rurales à l'inverse des grands barrages qui sont à l'origine des déplacements des populations rurales
- Création des emplois pendant la durée de chantier

III.2. Schémas types de l'aménagement collinaire

Un aménagement collinaire est défini par l'ensemble des ouvrages constituant la retenue elle-même et les structures d'utilisation des eaux stockées.

Les différents schémas type d'un périmètre irrigué alimenté par un lac collinaire sont reportés à la Figure III.1. Dans le premier cas de figure, il s'agit d'un réseau d'irrigation à écoulement **gravitaire** avec distribution par ruissellement, servi par un canal directement alimenté à partir du lac (Figure III.1 a).

L'adduction et la distribution peuvent être réalisées avec des conduites **sous pression**, l'irrigation ayant lieu toujours par écoulement à surface libre (Figure III.1b) ou par aspersion si l'on dispose d'une dénivellée naturelle suffisante (Figure III.1c). Dans le cas d'une irrigation par aspersion et que la charge disponible est insuffisante, il est nécessaire d'implanter dans le réseau une station de pompage (Figure III.1d). Une station de pompage est également indispensable pour alimenter les zones en amont du barrage si le périmètre

irrigué est situé à un niveau plus élevé que le niveau de la retenue du barrage. La construction d'un lac collinaire s'effectue normalement dans son propre bassin versant. Néanmoins, lorsqu'un envasement important est à craindre, ou que les conditions morphologiques du bassin ne sont pas favorables, le lac collinaire peut être réalisé « en parallèle » en dérivant l'eau d'alimentation d'un cours d'eau adjacent (Figure III.1 e). Dans ce cas, il faut prévoir un ouvrage de prise sur le cours d'eau et un canal de dérivation. Cette complication est, toutefois, compensée par l'absence de problèmes dus à l'envasement et à l'évacuation des crues. Le schéma type d'un réseau de distribution d'eau potable pourvu de bornes fontaines, alimenté par une retenue collinaire, est reporté à la Figure III.1f.

III.3. Phases de réalisation d'un barrage Collinaire

Les trois phases de réalisation d'un barrage collinaire sont identiques à celles présentées dans le Chapitre I, soit:

- Etude Préliminaire de l'Avant Projet Sommaire (APS) : Elle concerne les reconnaissances et les études générales de la zone concernée.
- Etude d'Avant Projet Détaillé (APD) : Elle comprend les études des lacs collinaires présélectionnés lors de la phase préliminaire.
- Etude d'Exécution : Elle concerne les conditions d'organisation, les prescriptions techniques pour l'exécution et le contrôle de l'ouvrage.

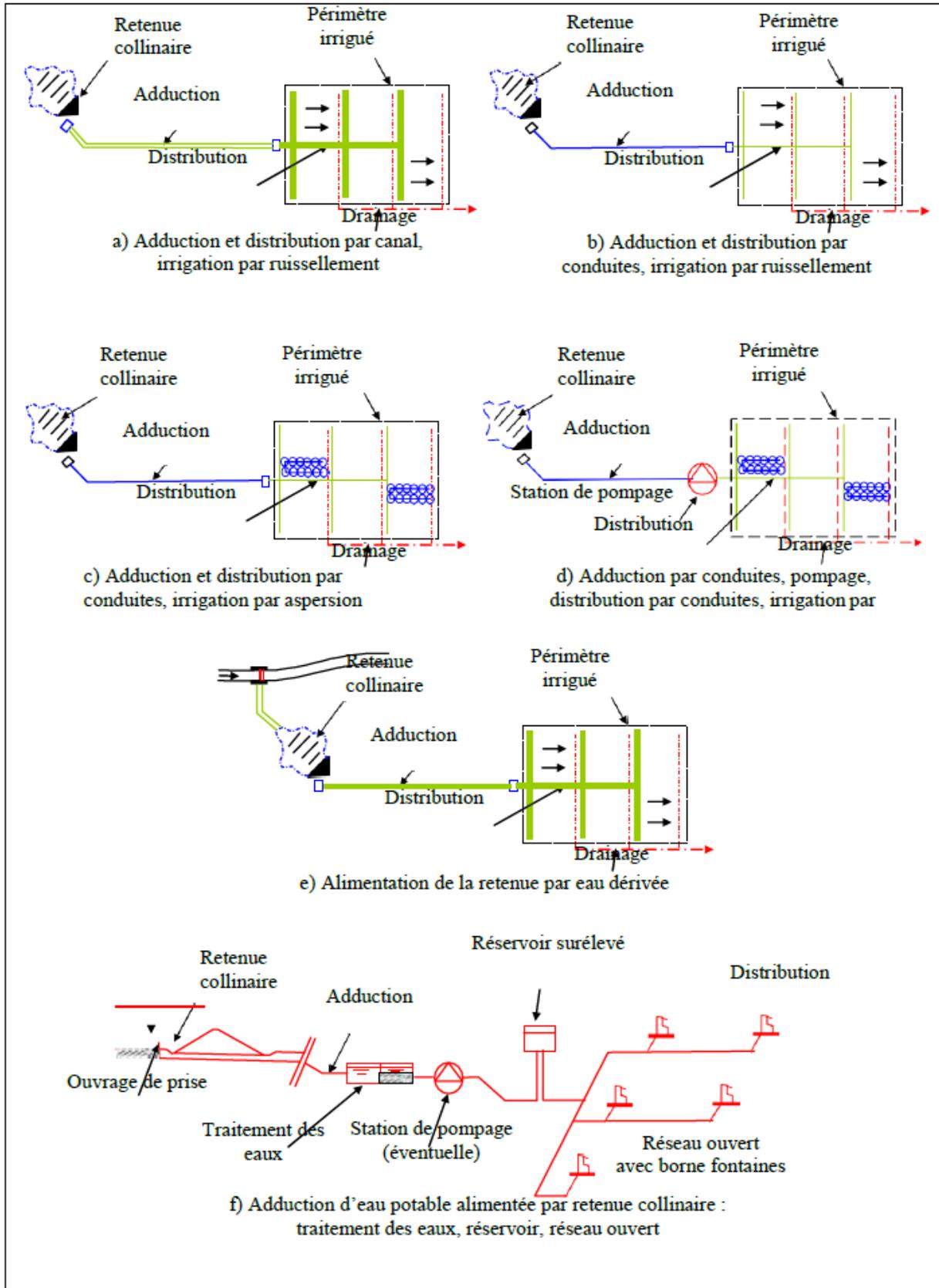


Figure III.1: Les différents schémas types d'aménagement collinaire (PNUD/OPE, 1987)

III.4. Différents types des barrages collinaires

Les barrages se classent en fonction du type de matériaux utilisés pour leur construction. Les deux types les plus largement utilisés dans les barrages collinaires sont :

- soit en **béton et/ou en maçonnerie** parmi les **barrages rigides** (Figure III.2),
- soit des **barrages souples en terre et/ou enrochements**

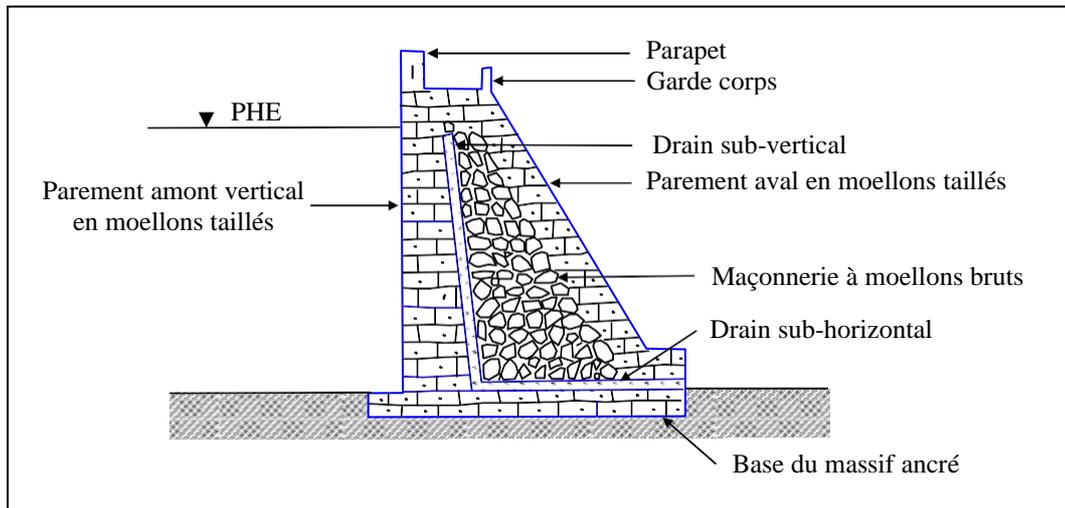


Figure III.2: Barrage rigide en maçonnerie (PNUD/OPE, 1987)

Les barrages **souples** sont les plus employés de nos jours pour toutes les catégories de barrages, Grands, moyens et petits et comprennent les types suivants :

- * Pour les barrages en terre:
 - a- en terre zonée (Figure III.3a)
 - b- en terre homogène (Figure III.3b)
 - c- en terre du type avec écran d'étanchéité (Figure III.3c)
- * Pour les barrages en enrochement:
 - a- avec écran interne d'étanchéité (Figure III.4a)
 - b- avec masque d'étanchéité extérieur (Figure III.4b)

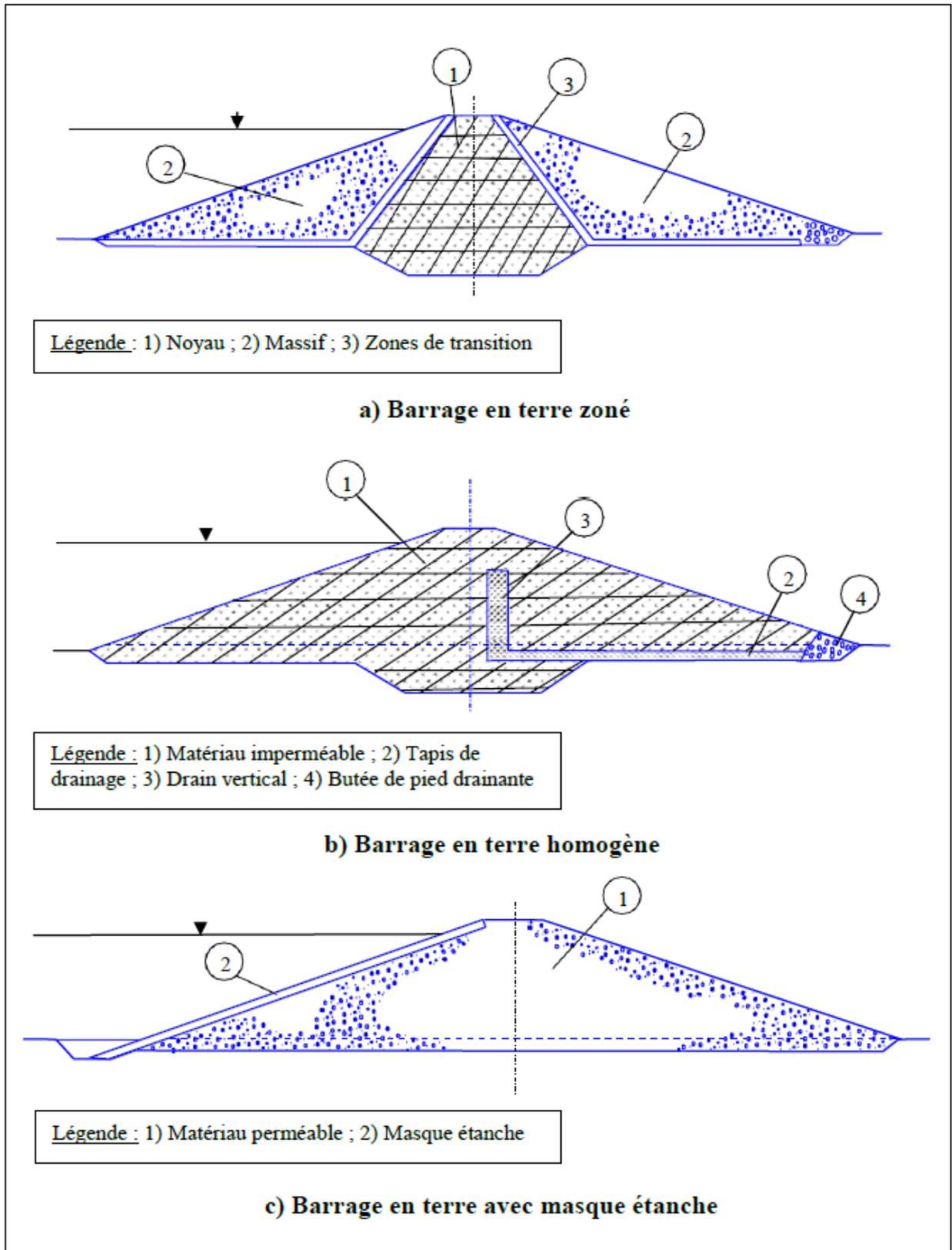


Figure III.3: Différents types de Barrage en terre (PNUD/OPE, 1987)

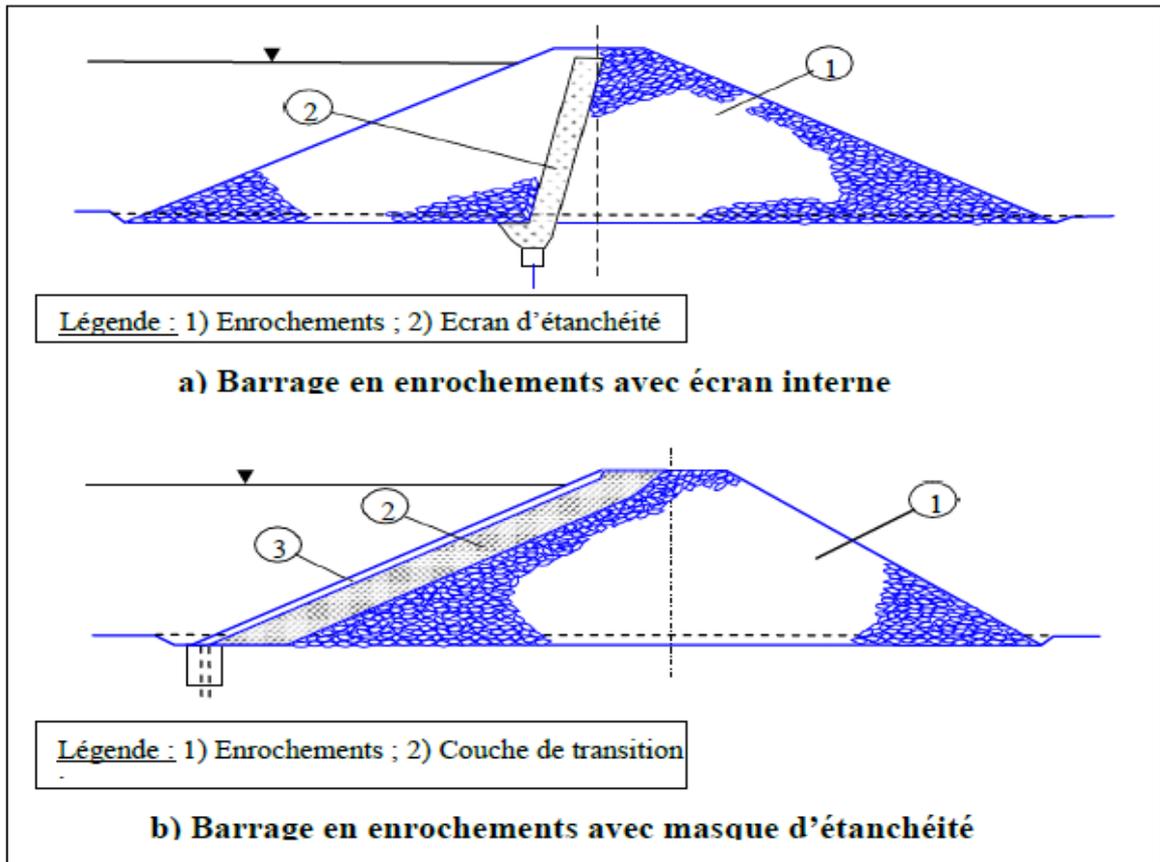


Figure III.4: Différents types de barrage en enrochements (PNUD/OPE, 1987)

III.5. Critères de conception des digues en terre et/ou en enrochements

Les barrages souples qu'ils soient en terre et/ou en enrochements, doivent offrir, les meilleures garanties de sécurité et de stabilité, aussi bien lors de la construction que pendant la vie utile de la retenue. A cette fin, les critères de sécurité suivants doivent être respectés tant au cours de l'étude qu'au cours de la réalisation :

- 1- Les ouvrages **d'évacuation** des crues doivent être correctement dimensionnés, de façon à éviter des débordements incontrôlables;
- 2- Les pentes des talus du remblai doivent être **stables** tant au cours de la construction qu'au cours de l'exploitation en conditions extrêmes (vidange rapide etc.);
- 3- Le barrage ne doit pas transmettre aux fondations des **efforts** excessifs;
- 4- Le phénomène **d'infiltration** dans le corps du barrage et dans les fondations doit être strictement contrôlé, afin de garantir la stabilité de l'ouvrage et de réduire les fuites;
- 5- Le mouvement des **vagues** pouvant survenir dans la retenue ne doit donner lieu à aucun débordement ni aucune érosion du parement;

6- La réalisation d'un barrage dans une zone sujette aux **séismes** nécessite une étude de stabilité préalable qui tient compte de ces efforts exceptionnels.

III.6. Les fondations et les traitements à adopter

Une fondation doit garantir un support stable au corps du barrage dans toutes les conditions de charge et d'humidité du remblai. De plus, elle doit limiter les infiltrations en vue d'éviter les fuites excessives de l'eau stockée et le risque de siphonnement.

Les fondations peuvent être perméables ou imperméables : les premières ne présentent, en général aucun problème de stabilité et/ou de tassement ; les secondes éliminent les problèmes liés aux infiltrations. En règle générale, il est toujours possible d'intervenir sur les fondations afin d'améliorer leur stabilité ou de réduire les fuites. Toutefois, chaque intervention devra être choisie de façon appropriée, en prenant soin d'éviter les solutions compliquées dont la réalisation ne se justifie pas pour un petit ouvrage de retenue. Les interventions systématiques sur les fondations comprennent :

- **Décapage** sur une épaisseur de l'ordre de 0.50 m (jusqu'à la fondation imperméable).
- Si la fondation imperméable n'est pas atteinte après décapage, la solution consiste à réaliser une Tranchée **d'ancrage** qui permet:
 - 1) D'assurer une bonne **liaison** entre la fondation et le corps de la digue,
 - 2) Dans le cas de fondation légèrement perméables, la trajectoire des courants d'infiltrations augmente ; ce qui permet d'éviter les risques de **renard** (érosion régressive),
 - 3) Dans le cas de fondation perméable, **l'étanchéité** est assurée lorsqu'elle descend jusqu'à une couche imperméable,

Pour mieux illustrer les types de traitement à adopter dans les différents cas, il est opportun de distinguer les trois types de fondation selon la nature des terrains et donc leur perméabilité :

- 1) matériaux rocheux
- 2) matériaux granulaires grossiers (sables et graviers)
- 3) matériaux fins et très fins (limon et argile)

III.6.1. Les fondations en matériaux rocheux

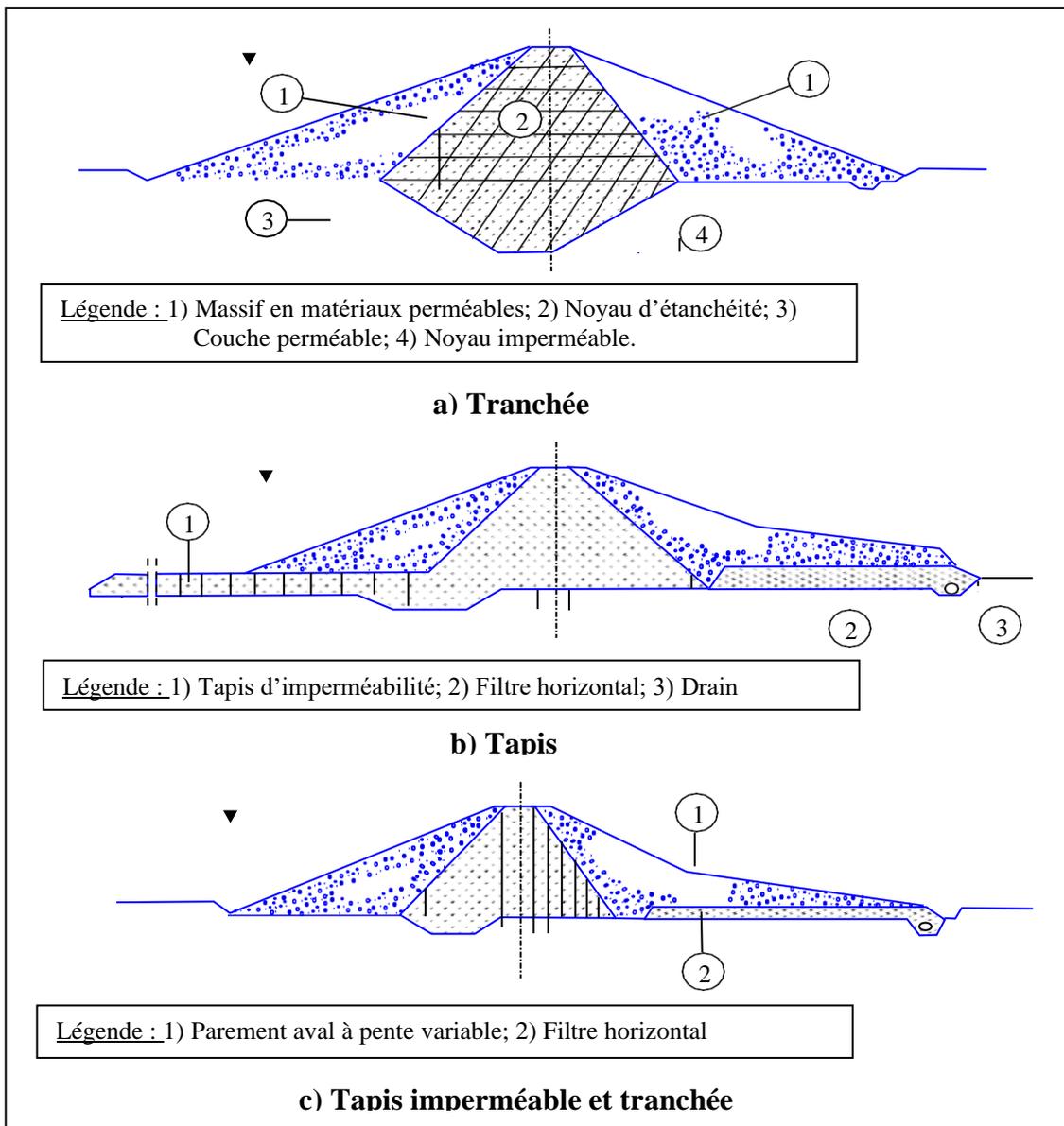
Souvent, ces fondations ne présentent pas de problème de résistance, mais sont caractérisées par des perméabilités élevées. Dans ce cas, il n'est pas conseillé d'avoir recours à un écran d'injection car son coût, sa technique sophistiquée et les délais de réalisation importants ne se justifient pas pour ce type de retenue. Il est préférable de prolonger et/ou d'approfondir le dispositif d'étanchéité du remblai. Le cas échéant et lorsque l'économie du projet le permet, un tapis imperméable (géotextile par exemple) sur toute la surface du bassin de retenue peut être adopté.

III.6.2. Les fondations en matériaux granulaires grossiers

Elles présentent des problèmes liés aux fuites d'eau par **infiltration** qui affectent l'économie de l'ouvrage suite aux pertes d'eau importantes. Ces infiltrations ont pour conséquencel'entraînement des particules les plus fines de l'assise aval. Ce qui réduit la **stabilité** de l'ouvrage et peut conduire à l'éroulement total de la digue. Parmi les nombreuses solutions qui peuvent être adoptées, nous distinguons:

- 1) la tranchée d'ancrage (Figure III.5a)
- 2) le tapis imperméable amont (Figure III.5b)
- 3) les tapis imperméable et tranchée drainant (Figure III.5c)

Figure III.5: Quelques Solutions pour réduire les infiltrations : Cas de fondation en matériaux granulaires grossiers (PNUD/OPE, 1987)



III.6.3. Les fondations en matériaux fins à très fins

Elles sont suffisamment imperméables mais, en revanche, peuvent présenter des problèmes de **stabilité**. Les traitements à effectuer contre les risques d'éroulement dus des charges excessives dépendent strictement de la nature des sols, du niveau de la nappe et du degré de cohésion des grains. Ces fondations peut être classifié en deux types : saturées et non saturées.

Fondations saturées

Elles présentent une capacité limitée à la résistance aux charges transmises par le corps du barrage. Un des traitements suivants peut être appliqué :

- **excavation** des matériaux de mauvaise qualité lorsque leur volume est réduit;
- construction de **drains** verticaux facilitant la **consolidation** des fondations sous l'effet des charges transmises par le remblai;
- réduction des **pentés** des talus de la digue pour allonger les surfaces de glissement potentielles (Figure II.6)

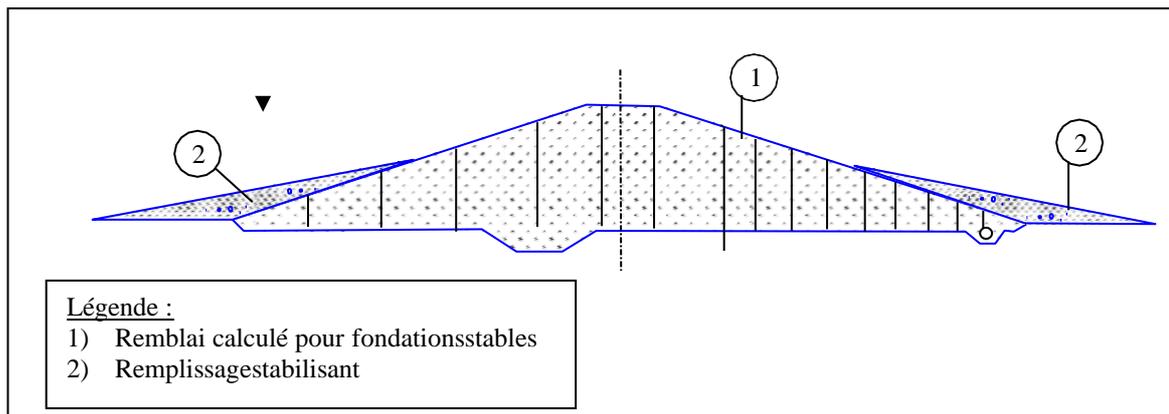


Figure III.6: Remplissage stabilisant pour réduire les infiltrations : cas des fondations fines saturées (PNUD/OPE, 1987)

Fondations non saturées

Les fondations non saturées se prêtent bien à la réalisation des petits barrages. Mais, il arrive que des sols à faible densité, une fois saturés par les eaux de la retenue, se tassent sensiblement, en provoquant des dégâts importants (rupture de la portion imperméable du remblai, réduction excessive de la revanche, etc...). Ces tassements peuvent être réduits par décapage des couches superficielles ou par consolidation des sols avant et pendant la construction du remblai.

III.7. Les dimensions de la digue

III.7.1. Courbe hauteurs-capacités de la retenue

Nous considérons que les apports ou pertes venant de la nappe souterraine, les pertes par évaporation et l'effet des courbes de remous sont négligeables. Pour tracer la courbe de capacité d'un réservoir, nous divisons la tranche utile en n parties égales. Par la suite, il s'agit de déterminer la superficie correspondante à chacune de ces cotes (à l'aide d'un planimètre sur la vue en plan) permettant de calculer le volume de la retenue qui lui est associée. Pour simplifier ces calculs, il suffit de remplir le Tableau III.1.

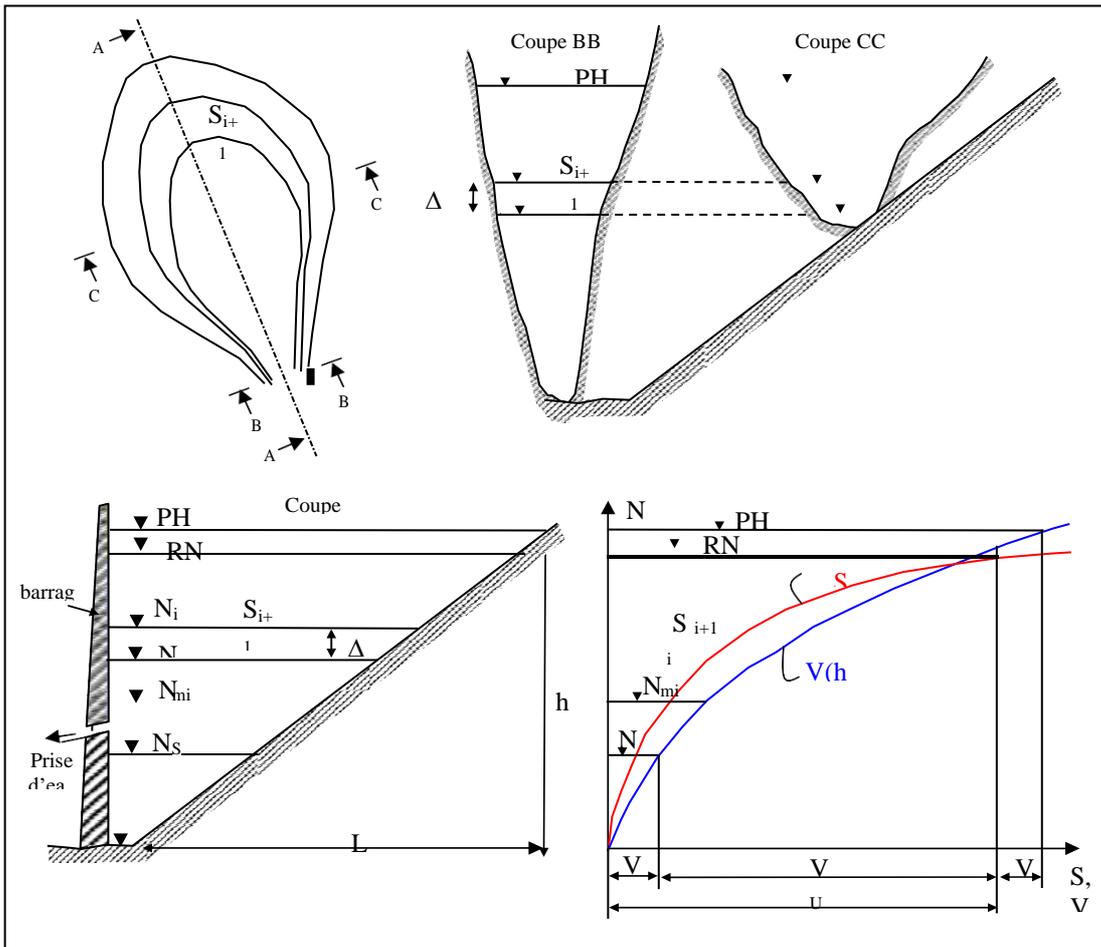


Figure III.7: Courbes hauteurs-capacités et hauteurs-surfaces d'une retenue

Tableau III.1 : Calcul de la relation cotes-volumes de la retenue ou de la digue (d'après PNUD/OPE, 1987)

Cote (mNGT)	Superficie (m ²)	Δh (m)	Volumes Partiels (m ³)	Volumes Cumulés (m ³)
N _i N _{i+1}	S _i S _{i+1}	Δh = N _{i+1} - N _i	ΔV = Δh (S _i + S _{i+1})/2	V _n V _{n+1} = V _n + ΔV

III.7.2. Hauteur de la digue

Les différents facteurs pouvant influencer le choix de la hauteur de la digue, mis à part les critères d'optimisation économiques, sont :

- l'importance de la **sédimentation** (qui détermine la tranchemorte)
- l'importance de l'**évaporation** (qui détermine les pertes)
- le **laminage** des crues (qui détermine la surélévation du plan d'eau)

Hauteur de retenue normale

La hauteur de la retenue normale est calculée en fonction de la tranche morte et de la capacité utile. Ainsi, on définit la hauteur de retenue normale comme étant la hauteur correspondant à la somme des volumes solide et utile: V_s+V_u(Figure II.1)

Le volume solide pouvant s'accumuler dans la retenue pendant la durée de vie probable du barrage (d, minimum 20 ans) est donnée par :

$$\text{Avec } V_s = Q_s d \tag{7}$$

$$Q_s = \frac{A \times S}{\gamma_s} \tag{8}$$

A : apports solides spécifiques moyens annuels (Kg/km²/an) S : superficie du bassin versant (km²)

La capacité utile V_u est obtenue par optimisation dans l'étude de régularisation (voir application). La courbe hauteurs-capacités de la retenue permet alors de déterminer la hauteur de la tranche morte ainsi que la hauteur de retenue normale (Figure III.7).

Charge maximale au-dessus du déversoir

Elle sera déterminée par l'étude de l'évacuateur de crues (voir application)

b-1) Revanche

La revanche de protection contre le **batillage** des vagues permet d'éviter la submersion de la digue. Définit comme étant la hauteur au-dessus du niveau des plus hautes eaux, elle constitue ainsi une tranche supplémentaire d'amortissement des crues exceptionnelles.

La hauteur de la revanche, H_R , est donnée par la formule suivante :

$$H_g = H_v + \frac{U_v^2}{2g} \quad (9)$$

H_v et U_v désignent respectivement la hauteur et la vitesse des vagues.

La hauteur H_v des vagues peut être calculée par la formule empirique de Stevenson :

$$H_v = 0,76 + 0,3\sqrt{L} - 0,3^4\sqrt{L} \quad (10)$$

avec

L : longueur de la retenue suivant la direction du vent (km)

H : hauteur des vagues (m)

La vitesse de propagation des vagues en m/s est donnée par la formule suivante (pour des hauteurs de vagues comprises entre 0.5 et 1 m) :

$$U_v = 1,5 + 0,67H_v \quad (11)$$

En résumé la hauteur hors sol de la digue est la somme de **trois** termes :

- 1) la hauteur de la digue correspondant à la cote de retenue normale
- 2) la hauteur d'eau maximale sur le seuil du déversoir (cette hauteur est généralement de l'ordre du mètre pour les petites digues).
- 3) La revanche qui dans la pratique n'est jamais inférieure à 1.0 m (dans le cas de petites retenues, la crête de la digue se situe entre 1.50 et 2.00 m au dessus du seuil de l'évacuateur). Il ne faut pas sous estimer cette hauteur dans le coût de la retenue.

III.7.3. Largeur en crête de la digue

La largeur en crête ne doit pas être inférieure à 3 m pour les digues de hauteur inférieure à 10 m et ce pour permettre la mise en œuvre des engins mécaniques. Pour les digues de hauteurs supérieures, la largeur de crête généralement adoptée est le 1/3 de la hauteur de la digue.

III.7.4. Pentés des talus de la digue

La pente des talus dépend des caractéristiques des matériaux autant dans la confection de la digue. Elle est déterminée par le calcul de stabilité. Pratiquement, les valeurs **orientatives** des pentes de talus selon la hauteur et le type de digue en terre, sont données par le Tableau III.2 suivant.

A l'exception des digues de faibles hauteur (<5m), ces valeurs devront être vérifiées par le calcul de stabilité. Les Tableaux III.3, donnent les valeurs recommandées par le « Bureau of Reclamation ».

Pour les barrages en enrochements, les pentes des talus amont et aval sont de l'ordre de 1/1.15; ces pentes seront corrigées par l'étude de stabilité compte tenu des angles de frottement des matériaux de la fondation.

Il est important de souligner l'importance des pentes de talus sur le coût de la retenue du fait qu'elles influent de façon sensible sur le volume de terrassement.

Tableau III.2: Valeurs orientatives des pentes pour digues en terre

(d'après PNUD/OPE, 1987)

Hauteur de digue (m)	Type de digue en Terre	Pentes des parements (V/H)	
		Amont	Aval
< 5	1) Homogène	1/2.5	1/2.0
	2) à Zones	1/2.0	1/2.0
5 à 10	1) Homogène à granulométrie étendue	1/2.0	1/2.0
	2) Homogène à fort pourcentage d'argile	1/2.5	1/2.0
	3) à Zones	1/2.0	1/2.5
10 à 20	1) Homogène à granulométrie étendue	1/2.5	1/2.5
	2) Homogène à fort pourcentage d'argile	1/3.0	1/2.5
	3) à Zones	1/2.5	1/2.5

**Tableau III.3: Valeurs des pentes pour digues en terre recommandées par
«Bureau of Reclamation » (d'après PNUD/OPE, 1987)**

Barrages à noyau sur fondations stables

Type	Objectif	Possibilité de vidange rapide	Classement des matériaux du massif	Classement Des matériaux du noyau	Pente du talus amont	Pente du talus aval
Avec noyau de dimensions minimale	Tous	En mesure non critique	Tout venant GW, GP, SW Graveleux SP	GC, GM, SC, SM, CL, ML, CH, MH	2 : 1	2 : 1
Avec noyau de dimensions maximale	Atténuation des crues ou contrôle	Non		GC, GM, SC, SM, CL, ML, CH, MH	2 : 1 2 : 1/4 : 1 2 : 1/2 : 1 3 : 1	2 : 1 2 : 1/4 : 1 2 : 1/2 : 1 3 : 1
	contrôle	Oui		GC, GM, SC, SM, CL, ML, CH, MH	2 : 1/2 : 1 2 : 1/2 : 1 3 : 1 3 : 1/2 : 1	2 : 1 2 : 1/4 : 1 2 : 1/2 : 1 3 : 1

Barrages homogène sur fondation stables

Type	Objectif	Possibilité de vidange rapide	Classement des matériaux dumassif	Pente du talus amont	Pente du talus aval
Homogène ou homogène drainé	Atténuation des crues ou contrôle	Non	GM, GP, SW, SP		
			GC, GM, SC, SM	2 : 1/2 : 1	2 : 1
			CL, ML	3 : 1	2 : 1/2 : 1
			CH, MH	3 : 1/2 : 1	2 : 1/2 : 1
Homogène drainé	contrôle	Oui	GM, GP, SW, SP GC, GM, SC, SM CL, ML CH, MH	3 : 1 3 : 1/2 : 1 4 : 1	2 : 1 2 : 1/2 : 1 2 : 1/2 : 1

Classification des matériaux cohérents

GW	Graviers bien classés, mélange gravier- sable moyen ou grossier	ML	Limon non organique et des sables très fins, grains rocheux, limon ou sable fin argileux de grande plasticité
GP	Graviers moins classés, mélange de gravier- sable-limon moyen ou grossier	CL	Argile non organique de moyenne ou faible plasticité, argile graveleux ou sableux ou Limoneux
GM	Graviers limoneux, mélange de gravier, sable, limon moins classés	OL	Limon organique et argile limoneux organique de faible plasticité
GC	Graviers argileux, mélange de gravier, sable, argile moins classés	MH	Limon non organique, sable ou limon fins, limon élastique
SW	Sables bien classés, gravier sableux, moyen ou grossier	CH	Argile non organique de grande plasticité, argile grossier
SP	Sables moins classés, sables graveleux moyens ou grossiers	OH	Argile organique de moyen et de grande Plasticité
SM	Sable limoneux, mélange de sable-limon moins classé	PT	Tourbe et autres sols fortement organique
SC	Sables argileux, mélange de gravier, sable et argile moins classé	OH	Argile organique de moyen et de grande Plasticité
		PT	Tourbe et autres sols fortement organique

III.7.5. Volume de la digue

Les principales dimensions de la digue étant déterminées, le volume de la digue peut être estimé de la même manière que pour le volume de la retenue (§ III.7.1). La Figure III.9 montre les différentes étapes de calcul du volume de la digue. Le Tableau III.1 est également utilisé pour faire les calculs.

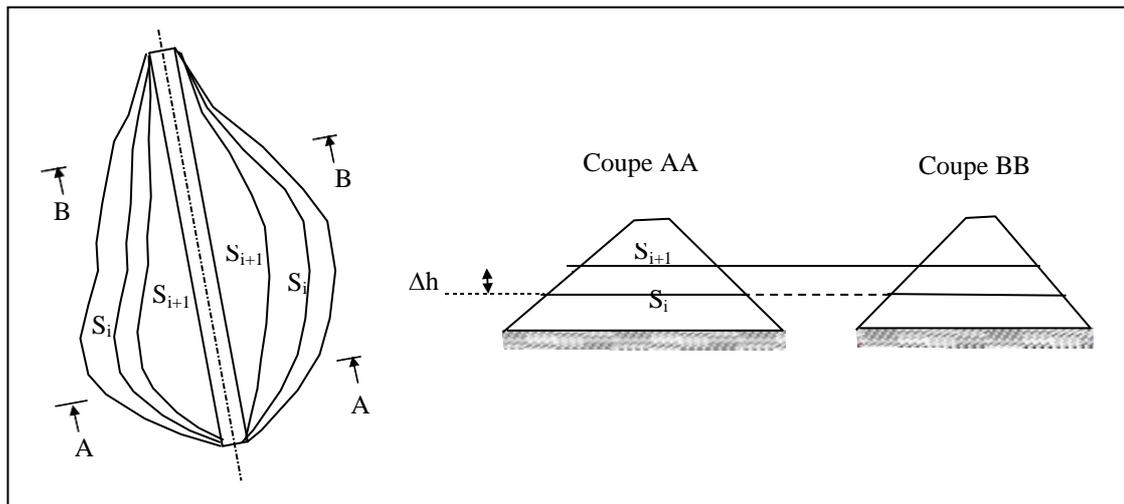


Figure III.9: Calcul du volume de la digue

III.8. Etudes des infiltrations dans le barrage et la fondation

Dans un barrage en terre formé de matériaux plus ou moins perméables, l'eau de la retenue a tendance à **s'infiltrer** dans le corps du barrage **et** dans les terrains d'assise, souvent perméables, pour venir resurgir à l'aval. Ces infiltrations ne seront pas gênantes tant qu'elles n'affecteront pas la sécurité de l'ouvrage et qu'elles ne dépasseront pas un certain débit au delà duquel le barrage risque de ne plus remplir efficacement son rôle.

L'ingénieur projecteur aura comme objectif premier de réduire à des valeurs acceptables les débits d'infiltration, et enfin de les contrôler. Il importe donc que les caractéristiques des matériaux du massif et de la fondation soient bien connues car elles influent considérablement sur les phénomènes d'infiltration.

Le corps du barrage et les terrains d'assise doivent opposer aux cheminements de l'eau une résistance telle que les pertes de charge soient suffisantes pour que toute **résurgence** éventuelle à l'aval se produise à des vitesses assez faibles. Par conséquent, aucun des matériaux, même les plus fins, ne peut être entraînés par les courants d'infiltration. Si ces courants sont suffisants pour entraîner les matériaux vers l'aval, des phénomènes de renards se forment et amèneront, plus ou moins rapidement, à la ruine du barrage. Outre le danger de renards, les infiltrations peuvent entraîner des effondrements dans le talus aval. Les infiltrations entraînent à la fois la **saturation du talus aval** et la circulation de l'eau dans celui-ci, et aboutissent ainsi à favoriser **des glissements du talus aval**, et par conséquent la ruine de l'ouvrage.

Les études des infiltrations dans un barrage en terre concerne : positionnement de la digue de saturation, tracé des lignes de courant ($\psi = \text{cte}$) et des équipotentielles ($\phi = \text{cte}$), pression interstitielle en un point, distribution des sous-pressions sous le massif et détermination du débit d'infiltration.

D'une manière générale, le débit de fuite par unité de largeur à travers l'assise perméable est donné par l'expression suivante (Figure III.10) :

$$q = \frac{m}{n} K \Delta h \quad (12)$$

q : débit de fuite par unité de largeur ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) m : nombre de ligne de courant

n : nombre de lignes équipotentielles

Δh : la différence de niveau entre la charge amont et la charge aval (m)

K : perméabilité équivalente (m/s)

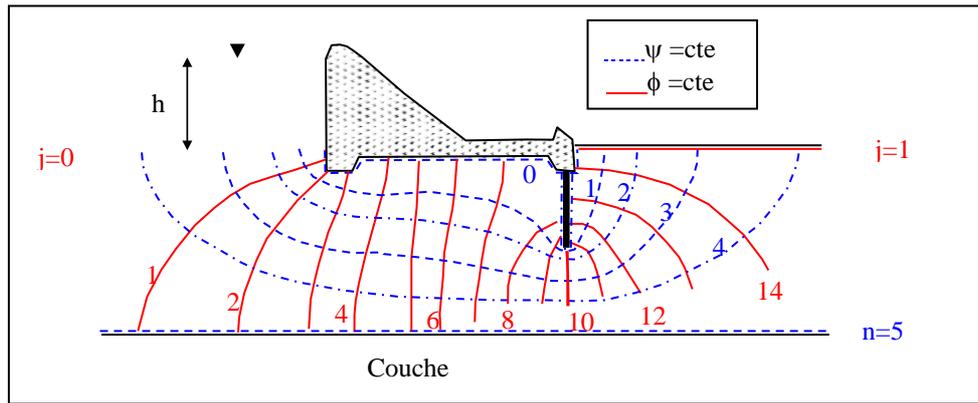


Figure III.10: Réseau des lignes de courants et des équipotentielles à travers les fondations homogène d'un barrage avec écran (Graf, 1991)

Pour un milieu non isotrope, la perméabilité intervenant dans l'équation (8) est substitué par

$$K=(k_v.k_h)^{1/2} \quad (13)$$

1- Cas d'un massif homogène reposant sur une fondation imperméable sans dispositif de drainage

Pour un massif ne comportant pas de dispositif de drainage (tapis, cheminée ou butée de drainage), Kozeny a montré que la ligne phréatique peut être assimilée à une courbe parabolique d'axe horizontal, de foyer O au pied de la digue (Figure III.11).

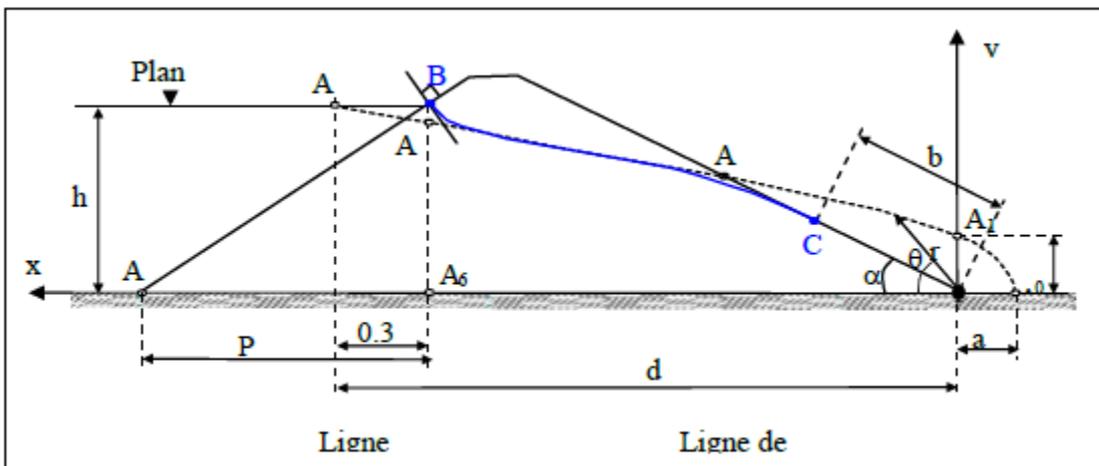


Figure III.11: Ligne phréatique à partir du parabole de Kozeny (PNUD/OPE, 1987)

Ce parabole passe par les point A₄, A₃, A₂, A₁ et A₀ avec A₄ est le point du plan d'eau amont ; A₃ ; ; A₂ : intersection de la ligne phréatique avec le parement aval, A₁ : intersection du parabole de Kozeny avec l'axe y et A₀ : intersection du parabole de Kozeny avec l'axe x.

A partir du parabole théorique de Kozeny, la ligne phréatique est déterminée graphiquement de la manière suivante :

- Tracer la normale au parement amont au point B, intersection du plan d'eau amont avec le parement amont, la ligne phréatique est tangentielle à la normale construit et à la partie médiane du parabolethéorique
- la partie médiane du parabole théorique est confondue avec la lignephréatique
- La troisième partie de la ligne phréatique est raccordée au point C tangentiellement à la parabole théorique (le point C est distant du foyer de la distance b).

Le débit de fuite peut être approché par les expressions suivantes, qui tiennent compte de l'angle α , angle que fait la face aval du massif avec l'horizontal :

* Si $\alpha < 30^\circ$

$$q = K b \sin^2 \alpha \quad (14)$$

avec, $b = (h^2 + d^2)^{1/2} - (d^2 - h^2 \cot^2 \alpha)^{1/2}$

* Si $30^\circ < \alpha \leq 180^\circ$

$$q = K y_0 \quad (15)$$

2) Cas d'une fondation relativement perméable

Dans ce cas, la longueur moyenne de la ligne d'infiltration est supposée égale à celle de la ligne de contact du massif imperméable avec la fondation perméable. Dans ce cas, le débit de fuite par unité de largeur de fondation perméable est (Figure III.12 a):

$$q = \frac{P K h}{E} \quad (16)$$

Avec,

P : profondeur de la fondation perméable

K : perméabilité de la fondation perméable

E : empattement du massif imperméable h : hauteur de la retenue

Cas d'un massif homogène relativement étanche

Dans ce cas, l'équation (12) est également valable en prenant comme valeur de E l'empatement de la digue homogène.

Cas d'un massif imperméable ancré dans l'assise perméable

Soit F la profondeur d'ancrage. Le débit d'infiltration à travers l'assise est alors (Figure III.12 b) :

$$q = \frac{1}{2} K h \log \frac{2P/E + \sqrt{1 + P^2/E^2}}{2F/E + \sqrt{1 + F^2/E^2}} \quad (17)$$

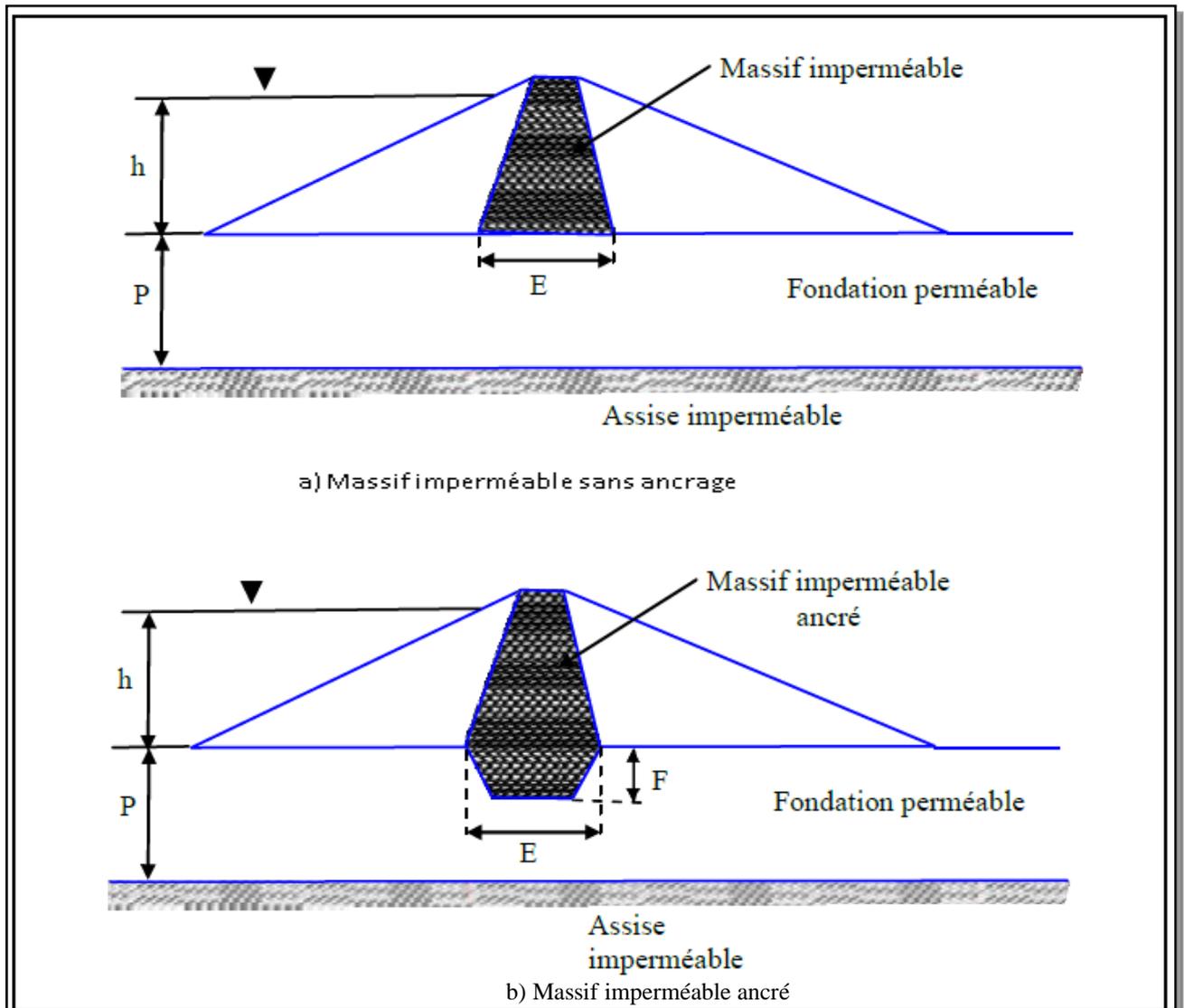


Figure III.12: Calcul du débit de fuite (PNUD/OPE, 1987)

III.9. Protection de la digue

La digue est soumise à l'**érosion** due au ruissellement **et** au vent. Il est donc nécessaire de la protéger, comme doit l'être le parement amont contre le **batillage** de l'eau. Le choix du type de protection doit tenir compte des matériaux disponibles localement. Les protections en enrochement se sont avérées dans la pratique les plus sûres.

CHAPITRE IV: OUVRAGE SOUTERRAIN "LES FOGGARAS"

IV.1. Introduction

L'examen de la carte du Sahara algérien révèle un chapelet d'oasis en forme d'arc de cercles qui s'étend du grand Erg Occidental au grand Erg Oriental. Au pied du plateau de Tademaït se succèdent ainsi les palmeraies du Gourara, du Touât et du Tidikelt, constituant une seule région saharienne dénommée par les anciens géographes "l'Archipel Touâtien".

La ceinture de Tademaït présente, quant les Ergs ne l'ont pas submergé un affleurement continu de grès et d'argiles. Cette falaise, dénommée Baten par les autochtones avec les larges échancrures des oueds sahariens, a depuis longtemps constitué une zone d'habitat.

Tous les éléments nécessaires à la vie s'y trouvent réunis: l'eau dans un pays en voie d'assèchement, la végétation, l'abri et la position défensive, les fossiles, les inscriptions rupestres, et les ateliers néolithiques représentent autant de témoins indiscutables. On peut imaginer aisément que la série des sources jalonnant les émergences du continental intercalaire aient été les derniers refuges d'une vie qui se résorbait avec le recul des eaux.

Le Sahara central serait probablement restée au stade de vie néolithique si les foggaras n'y avaient fait leur apparition. Ce sont les foggaras qui ont réalisé ce prodige de redonner la vie à une des régions les plus arides du globe avec une pluviométrie quasi nulle, des températures excessives et des vents violents envahissant les sables.

Comme le génie de l'homme l'emporte toujours sur l'hostilité de la nature, la création des foggaras était une grande découverte favorable à l'implantation des oasis, Ces oasis constituent une forme majeure d'adaptation de l'homme aux fortes contraintes d'aridité du milieu.

IV.2. Historique et origine

Le terme de foggaras désigne une canalisation d'eau souterraine. Hydrologiquement il semblerait que le nom provient du mot arabe " l'Archipel Touâtien " (creuser), d'autres pensent que ce terme provient du mot arabe "*El Fokr*" (la pauvreté), c'est-à-dire que celui qui creuse une foggara se trouve dans l'obligation d'y investir tellement qu'il finit par tomber dans le besoin avant d'en bénéficier. D'autres encore pensent que le nom de foggara est relatif à "*Fakra*" (vertèbre en arabe). La désignation la plus correcte semble provenir du mot arabe "*Fadjjara*" (faire jaillir) qui désignerait la sortie de l'eau de la bouche d'un canal.

Le terme foggara utilisé en Afrique du Nord n'est pas employé en Orient pour désigner la même chose. En Iran, elle porterait le nom "*Qanât*", en Afghânistân "*khiras*", en Yémen "*sahrig*". En Espagne le nom de la ville Madrid provient du mot arabe "*medjrit*" (canal).

En Afrique du Nord, les appellations suivantes lui seraient données:

- Chegga à Bou-saâda.
- N'goula ou krîga dans le sud tunisien.
- Khettara au Maroc.

La foggara n'est pas une originalité touâtienne, l'histoire nous apprend que les Assyriens et les perses la connaissaient depuis bien longtemps et que les romains l'ont utilisée en Syrie. C'est en effet dans le royaume d'Ourartou autour du lac d'Armya qu'elle apparaît au début du 1^{er} millénaire. Sans doute n'est-elle à l'origine qu'une simple technique d'exhaure, conçue pour évacuer les eaux suintement qui menacent d'inonder toute galerie minière pénétrant l'intérieur d'un niveau aquifère souterrain. Le génie Ourartéen fut de "détourner" cette technique minière banale pour en faire ce qu'elle est devenue, c'est-à-dire une technique spécifiquement agricole de captage d'une nappe en vue de l'irrigation.

Les peuples pasteurs autochtones qui occupaient le Sahara central se cantonnaient autour des points d'eau naturels dont le nombre et l'importance allaient en décroissant. Ce sont les tribus d'invasion qui ont amené la pratique perfectionnée de l'utilisation des eaux souterraines.

Il serait intéressant de connaître comment et par qui la foggara a été introduite au Sahara. Les chroniqueurs arabes du Touât et du Tidikelt prétendent que la foggara est une "invention" qui est venue de Marrakech, basée sur un texte d'El Iderissi (7^{ème} siècle: le premier siècle de l'Hégire).

Dans le "Echrâa El Bassit", le taleb Si Moulay Hassane d'Akebli a dit qu'El Malik El Mansour Ben Youcef Tajefit El Korichi (saoudien), est le premier homme qui a creusé la foggara "Hannou" à Tamentit. Les foggaras se multiplièrent par la suite et atteignirent en l'an 300 de l'Hégire le nombre de 360. La quasi-totalité de ces foggaras, ajoute le chroniqueur, a été appropriée par les Juifs de Tamentit. A partir de cette époque, elles sont généralisées dans tout le Touât et le Tidikelt.

IV.3. Les différents types des Foggaras

Selon le contexte géologique et hydrogéologique dans lequel elles sont creusées, différents types de foggara peuvent être distingués :

a. Les Foggaras du continental intercalaire

Ce groupe contient le plus grand nombre des foggaras sahariennes (Touât, Gourara et Tidikelt). Dans les parties gréseuses du continental intercalaire (Touât en particulier), la galerie est étroite propre et bien taillée et ne dépasse pas 0.6 m de largeur.

Dans la partie méridionale et au Tidikelt, les foggaras sont creusées dans la formation argilo-sableuses du continental intercalaire et sont bien taillées. Les parois s'effritent, la galerie s'élargit et il se forme de grandes cavernes par l'effet d'éboulement.

b. Les Foggaras du Tertiaire continental et de la Dalle calcaire

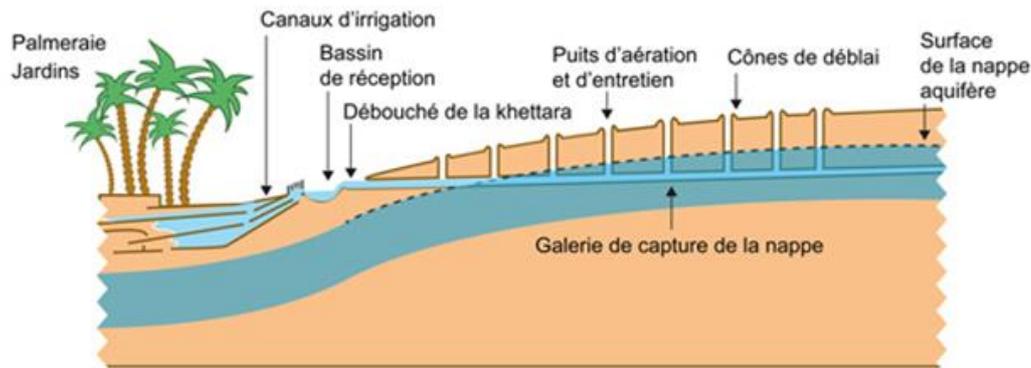
A la lisière sud d'Erg, un certain nombre de foggaras sont creusées dans la dalle calcaire coiffant la hamada. Elles sont peu profondes (3,5 m au puits amont) et ont un fort débit.

c. Les Foggaras des alluvions quaternaires

Les plus typiques sont celles du Hoggar à Tamanrasset. Elles sont creusées dans les arènes et sables grossiers des alluvions de l'oued. Le manque de cohésion des matériaux, constituant la voûte et les parois ainsi que les dégâts provoqués périodiquement par les crues, leur donne un aspect ruinforme particulier. La partie amont qui se trouve le plus près de l'axe de l'oued est détruite et comblée, la foggara est alors reconstituée à une dizaine de mètres de l'oued. La succession de puits, d'âge différent, donne un ensemble topographique chaotique et incohérent d'aspect très différent des alignements connus au Touât, Gourara et Tidikelt.

IV.4. Description de la Foggara

La foggara est une galerie drainante souterraine, véritable puits subhorizontal, dotée d'une pente longitudinale suffisante pour que les eaux captées dans le niveau aquifère s'écoulent jusqu'à l'air libre par le seul effet de gravité (figure IV.1).



FigureIV.1: Principe de captage de l'eau

Les dimensions de la galerie doivent permettre à un homme de s'y mouvoir et d'y travailler. Une hauteur de 1.30 m pour une largeur de 0.80 m constitue un ordre de grandeur moyen. Quant à la longueur, elle est très variable, de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres, sa moyenne est de l'ordre de 3 Km environ.

En surface, la présence d'une galerie se manifeste par le chapelet des événements (*Hassi*), les puits d'aération (les conduites de descente verticales) qui à des intervalles de six à trente mètres et même plus, permettent l'accès direct lors du creusement et de l'entretien. Leur profondeur croît de l'aval vers l'amont ou elle atteint couramment plusieurs dizaines de mètres. Chacun d'eux s'entoure d'une auréole de déblais, sorte de taupinière géante éventrée en son centre par l'orifice de puits lui-même. Chaque puits est dénommé "*Hassi*". La galerie souterraine reliant les puits entre eux est appelée "*Eneffad*".

Dès qu'elle abandonne la couche des grès à l'approche de la dépression, la galerie devient une canalisation creusée à ciel ouvert, puis recouverte, elle prend le nom "*Aghisrou*".

Quand elle débouche à l'air libre c'est le "*Majra*". Un peigne répartiteur "*Kasria*" barre alors la canalisation à sa sortie (figure IV.2). Ce peigne correspond à une pierre plate percée de trous pour la répartition de l'eau. Une série de "*Seguias*" partant de ce peigne vont amener l'eau dans le bassin terminal, "*Magen*" (figure IV.3). C'est à partir du Madjen que s'effectue le partage de l'eau entre les copropriétaires.

On peut ajouter une manche de puits à une foggara pour augmenter son débit. Cette manche doit être inclinée de trente à quarante cinq degrés environ par rapport à la partie mère, celle-ci est appelée "*Kraâ*".



FigureIV.2: Peigne répartiteur (*Kasria*)



FigureIV.3: Bassin terminal (*Magen*)

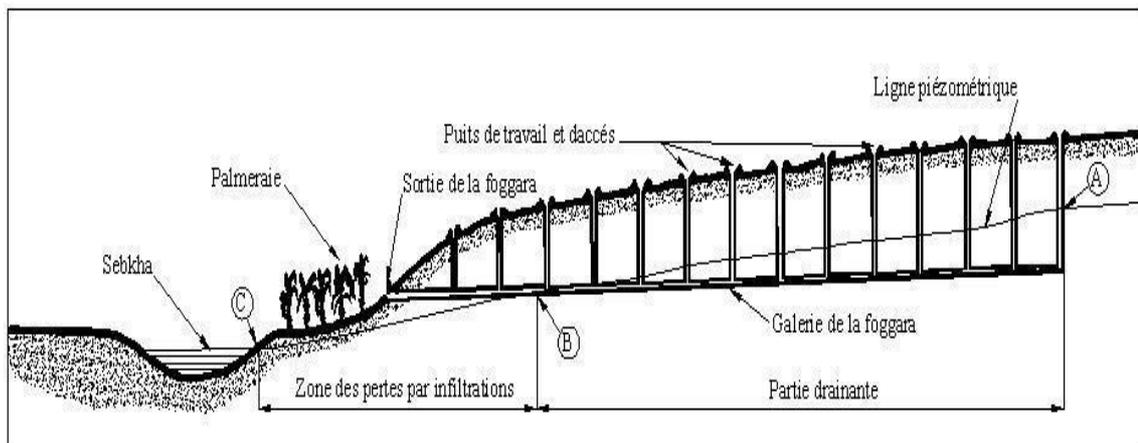
IV.5.Principe de fonctionnement

Le principe est à la fois simple Hydrogéologiquement (figure IV.4), la présence d'un relief provoque une inflexion du profil piézométrique des nappes libres des aquifères locaux qui ne trouvent d'exutoires que dans les zones dépressionnaires (oueds ou sebkhas).

Les galeries subhorizontales se subdivisent en deux sections :

- Une section captante à l'amont pénètre dans la nappe ;
- Une autre adductrice à l'aval, qui a pour seule fonction d'acheminer l'eau.

La direction des foggaras est indépendante du pendage des couches ; elle ne dépend que de la topographie locale, elle est toujours parallèle à la direction d'écoulement de la nappe au contraire d'une galerie drainante logiquement tracée. La galerie est la partie essentielle; les puits ne sont que des orifices d'évacuation des matériaux et d'aération.



FigureIV.4: Principe de fonctionnement d'unefoggara

IV.6.Facteurs influençant le fonctionnement de la foggara

a. La pente : Une pente régulière représente habituellement un bon compromis:

- Trop faible: elle favorise l'alluvionnement et accroît la fréquence des curages (Dialecte appelée *Aonât*).
- Trop forte: elle favorise l'érosion dans la galerie (Dialecte appelée *Amazer*).

La pente des foggaras a une valeur moyenne de l'ordre de 2 à 6 millimètres par mètre avec un très large écart autour de cette moyenne. Cette faible pente est insuffisante (compte tenu de l'irrégularité du fond de la galerie et des parois) pour assurer une circulation des eaux assez rapide, entraîner les matériaux étrangers et éviter l'ensablement. Il s'ensuit que les foggaras non régulièrement curées s'ensablent, par ailleurs, la côte de la bouche étant fixée par les nécessités de l'irrigation, il est difficile d'augmenter le rabattement et par conséquent le rendement de l'ouvrage.

b. La forme de la galerie

La forme de la galerie joue un rôle essentiel sur le fonctionnement d'une foggara. Dans cette dernière, on distingue:

- Des zones très étroites de l'ordre de 0,4 à 0,5 m de largeur, pour augmenter la vitesse d'écoulement et favoriser l'auto curage.
- Des zones très larges > 0,5 m et plus profondes jusqu'à 1,2m, permettent d'augmenter le volume d'eau, de piéger les sédiments provenant de la zone étroite et faciliter leur prélèvement.

IV.7. Evolution de la foggara

Elle évolue dans le temps, parallèlement aux besoins en eau qui augmentent avec l'extension des cultures. On tend alors à multiplier les puits; mais la progression est limitée par la falaise terminale du plateau dans certains cas. Par ailleurs, les difficultés augmentent avec la profondeur croissante des puits. Le puisatier essaiera alors d'approfondir le drain dans les grès. Là aussi, la difficulté est de maintenir une pente suffisante afin d'obtenir un bon écoulement de l'eau. En outre, l'appauvrissement en eau de la nappe vient compliquer considérablement la situation. On se trouve alors placé dans l'alternative suivante :

Soit approfondir la foggara et déplacer en conséquence, s'il est possible, les jardins vers le bas de la dépression ou bien abandonner la foggara et elle trépassé.

Dans la région, certaines foggaras présentent (quand on suit leur parcours souterrain) plusieurs galeries superposées. En surface, on observe des vestiges de jardins abandonnés qui correspondent au niveau d'irrigation des différentes galeries. La palmeraie se déplace et suit les mouvements de l'eau.

Mais il y a des cas où les jardins ne peuvent plus émigrer dans la dépression. Les bassins collecteurs finissent alors par se trouver au dessous du niveau des jardins et l'irrigation se fait par puisage (Fig. IV.5).

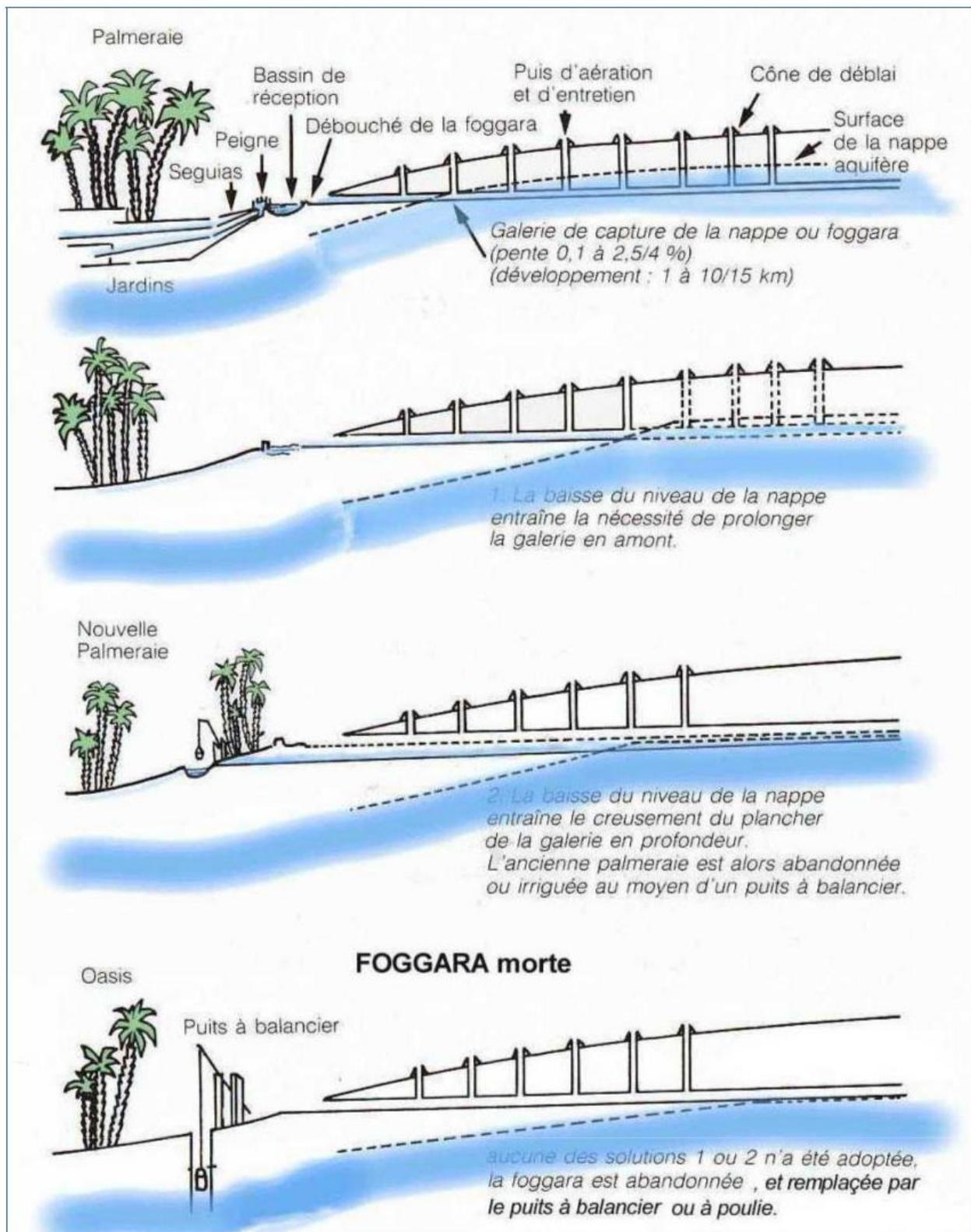


Fig. IV.5: Evolution de la foggara

IV.8. Le partage et la distribution de L'eau d'une Foggara

Une fois l'eau arrivée au niveau des jardins, son partage s'effectue selon deux méthodes : volumique et horaire.

IV.8.1. La méthode volumique

Ce type de partage est le plus répandu en Algérie. Dans toutes les oasis à foggaras albiennes, le partage de l'eau s'effectue par la méthode volumique. Chaque copropriétaire est destinataire d'un volume d'eau déterminé en fonction de sa contribution à l'entretien et à la maintenance de la foggara. Cette répartition est assurée par les kasriates (pluriel d'une kasria). Le réseau de distribution est équipé d'un nombre de kasriates qui est proportionnel au nombre d'abonnés. Les kasriates sont disposées en forme de pyramide. À partir de la kasria lakbira (principale) (Figure 10), une sorte de bassin triangulaire muni d'un partiteur (peigne) reçoit la totalité de l'eau de la foggara et répartit le débit en trois, quatre et même cinq rigoles (seguias). À partir de la kasria principale, les seguias vont en éventail dans tous les sens. Au bout de ses seguias, d'autres kasriates secondaires répartissent l'eau puis d'autres prennent naissance et ainsi de suite jusqu'aux guemouns (les jardins).

IV.8.2. La méthode horaire

Cette méthode de partage de l'eau, caractéristique des foggaras des sources, des montagnes et des oueds, est basée sur l'unité de temps. Le partage de l'eau s'effectue par le procédé horaire appelé *nouba*, c'est-à-dire tour à tour. Il est défini comme la durée de temps suffisante pour irriguer complètement le jardin. Le partage des eaux des khattaras de Tafilalet (Maroc) et des qanats (Iran) s'effectue selon le mode de la nouba. En Algérie, le partage de l'eau par unité de temps s'effectue actuellement pour les eaux des deux foggaras de Moghrrar (Naama); il fonctionne de la même façon que celui des khattaras marocaines. La répartition de l'eau entre les copropriétaires se déroule tour à tour.

Dans la région d'Adrar, par exemple, le partage des eaux de la foggara de Hanou, qui est une foggara horaire, s'effectue au tour à tour. Il n'y a pas de kasriates comme dans les autres foggaras avoisinantes. Des seguias relativement importantes partent directement d'un grand madjen (réservoir). La foggara est obstruée une à deux fois par jour pour permettre de reconstituer le niveau requis, puis l'eau est libérée pour un temps donné, proportionnel à la contribution financière versée par le bénéficiaire.

L'augmentation du nombre des bénéficiaires pousse les ksouriens à disposer d'un système de distribution propre à eux. A l'aide d'un outil ingénieux se fait la mesure d'une foggara et la distribution de ses eaux.

Cet outil dénommé la «*Hallafa*» dans la région de Touât (littéralement : celle par laquelle il faut jurer), «*Chegfa* » ou «*Louh*» dans le Tidikelt. Le mesureur est appelé par les Arabes «*al-kayle-al-asfar* » (la mesure jaune). Le *louh* est constitué d'un cylindre decuivre percé à sasurface latérale de trous de différents diamètres représentant des mesures avec leurs multiples et sous multiples. Ce cylindre est ouvert sur ses deux bases. Au moment de l'usage, il est légèrement enfoncé verticalement dans le lit de la «*Seguia*» préalablement bien aplanie. La «*Chegfa*» est placée à une distance constante du point ou doit se faire la répartition de l'eau. On voit par ces dispositions que l'on a cherché à avoir des conditions de charge déterminées.L'unité de mesure est la «*habba*». Elle correspond à un débit de 8,7 l/min dans les mêmes conditions de charge.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ansari T. 2004.** Système traditionnel d'exploitation des eaux souterraines foggaras, ANRH. Adrar. 2004. 30 p.
- ARRUS R. 1985.** L'eau en Algérie. De l'impérialisme au développement (1830-1962). Alger. O.P.U. Presses Universitaires de Grenoble. pp.388.
- ARRUS R. 1998.** L'eau et l'émergence d'un conflit nord-sud dans le bassin méditerranéen occidental. Revue Territoires en Mutation. n°3 .p. 95-109.
- AUBERTJ.1949.** Barrages et canalisation. Dunod. Paris.pp.558.
- BENBLIDIA M. 2011.**L'efficience d'utilisation de l'eau et approche économique. Etude nationale Algérie. Plan Bleu.centre d'activités régionales.PNUE/PAM.
- BERNARD M.1975.** Aménagements hydrauliques. Université Laval.
- BOUVARDM.1984.** Barrages mobiles et ouvrages de dérivation à partir de rivières transportant des matériaux solides. Eyrolles.pp.359.
- CARLIER M.1972.** Hydraulique générale et appliquée. Paris.Eyrolles. pp.565.
- CHOWV.T; Mc Graw Hill.1959.** Open channel hydraulics.NewYork.pp.680.
- DUPONT A.1977.** Hydraulique urbaine. 4ed. Paris. Eyrolles.pp.484.
- EGTH. 1991.** Economie de l'eau 2000. Rapport final.13 volumes.
- GINOCCHIO R.1959.**Aménagements hydroélectriques. Eyrolles.pp.480.
- GRAF W., ALTINAKAR M.S. 1993.**Hydraulique fluviale(tome I). écoulementpermanent uniforme et non uniforme. Presses polytechniques et universitaires romandes .Lausanne.pp. 259.
- GRISHIN M.M.1982.**Hydraulic structures.Vol.1. Mir Publishers .Moscou.pp.468.
- HASSANI. 1988.** Les méthodes traditionnelles de captage des eaux souterrainesdans le Sahara Algérien. Revue Techniqueset Sciences n°6. p. 20-24.
- HUG M.1975.** Mécanique des fluides appliquée aux problèmes d'aménagement et d'énergétique.Paris. Eyrolles.pp.172.
- LARRAS J. 1977.** Fleuves et rivières non aménagés.Eyrolles.pp. 187.
- LELIAVSKY S.1961.** Précis d'hydraulique fluviale. Dunod.pp.256.
- MAALEL K. 1996.** Cours d'hydraulique générale. Polycopie ENIT.
- MAGLAKELIDZE V.1984.** Ouvrages hydrotechniques. Polycopié ENIT.
- MRE- Ministère des Ressources en Eau. 2010.** Actualisation du Plan National de l'Eau. Travaux d'études en cours réalisés par le groupement Sofreco/ Grontmij-Carl Bro/ OIE. Rapports provisoires : Ressources et Demandes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- MOZASM., GHOSNA.2013.** État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. Etudes et analyses. IPEMED. Institut de prospectivité économique du monde méditerranéen.
- Office National des Statistiques.2006.** Compendium national sur les statistiques de l'environnement. Document publié par l'office national des statistiques. Alger.
- OLIEL J. 1994.** Un système d'irrigation original: les foggaras. Les juifs au Sahara ; le Touat au moyen-âge. Edition CNRS-histoire. Paris. 188p.
- PNUD. Programme des nations unies pour le developpement.2009.** Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie. Rapport. Alger
- PNUD/OPE. 1987.** Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du nord. Guide maghrébin pour l'exécution des études et des travaux de retenues collinaires. Projet RAB/80/011. Alger
- REMINIB., ACHOUR B et KECHADR.2010.** La foggara en Algérie : un patrimoine hydraulique mondial. Revue des sciences de l'eau. Volume 23. Numéro 2. p. 105–117.
- SENTURK F. 1995.** Hydraulics of dams and reservoirs. Water resources publication. pp.814.
- TRUCHOT C. 2006.** La politique de l'eau en France et ses perspectives d'évolution. Rencontre internationale sur la gestion intégrée des ressources en eau. 18-19 mars. ABHCSM. Constantine.
- VARLET H. 1966.** Barrages réservoirs (tome I). Hydrologie – Géologie. Paris.
- VARLET H. 1966.** Barrages réservoirs (tome II). Barrages-poids, barrages-voûtes. Paris .
- VARLETH. 1966.** Barrages réservoirs (tome III). Barrages en terre et en enrochements. Paris.