

UNIVERSITE HADJ LAKHDAR « BATNA »

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
ET DE L'UNIVERS

MASTER « GESTION DES RESSOURCES EN EAU »

2014

Polycopié de cours :
« TECHNIQUES DE MOBILISATION DES EAUX DE SURFACE »



Barrage en BCR : BENI HAROUN - ALGERIE

BRINIS NAFAA

Enseignant chercheur

Avant propos

*Ce document propose un cours du module intitulé
« Techniques de mobilisation des eaux de surface »
destiné aux étudiants en Master II
Spécialité : « géologie »
Option : Gestion des Ressources en Eau*

Ce polycopié est une synthèse tirée de différents ouvrages en relation avec le thème.

Il présente conformément au programme officiel, des définitions et des rappels sur les eaux continentales, les bassins versants, le cycle hydrologique et les écoulements de surface (Hydrométrie), outils principal pour la compréhension de la problématique de mobilisation des eaux superficielles. Il s'intéresse par la suite aux techniques utilisées, commençant par les barrages, en traitant : leurs types, leurs usages et leurs impacts sur l'environnement sans insister trop sur le détail des calculs en se limitant à l'essentiel. Et terminant par des ouvrages simples et utilisés localement : les boulis et les bâches à eau.

Etant très vaste et ramifié, le thème de mobilisation des eaux de surface touche plusieurs disciplines (géologie, géotechnique, hydrologie, hydraulique, génie-civil et hydromécanique), j'ai essayé dans l'élaboration de ce document de développer les aspects en relation avec le profil des étudiants auxquels ce document est destiné.

Ce cours sera amélioré et poursuivi prochainement par la version Travaux pratiques et dirigés, dans laquelle des exercices, des TP, des méthodes explicatives et complémentaires à ce cours seront proposés.

Enfin, mes hommages à tous ceux qui ont contribué indirectement à la réalisation de ce cours (auteurs des différents ouvrages) sans oublier ceux qui me feront le plaisir de consulter ce document et de l'enrichir.

BRINIS NAFAA

Intitulé du Master : Gestion des Ressources en eau

Semestre : 3

UEF 1 – Techniques de mobilisation des ressources en eau

Matière : Techniques de mobilisation des eaux de surface (H 209)

Enseignant responsable de l'UE :

Enseignant responsable de la matière:

Objectifs de l'enseignement : A l'issue de cette matière, les étudiants acquerront des connaissances sur les différents modes et techniques de mobilisation des eaux de surface tels que les barrages et les retenues collinaires.

Connaissances préalables recommandées : L'assimilation des connaissances afférentes aux matières hydrologie 1 et 2 est recommandée.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Rappels sur les bassins versants et les écoulements de surface

Chapitre 2 : Principaux éléments de calcul

Chapitre 3 : Les différents types de barrages

- Barrage poids
- Barrage voûte
- Barrage contreforts ou multivoûtes
- Barrages mobiles à aiguilles
- Barrages mobiles à battant
- Barrage en remblais
- Autres types de barrages

Chapitre 4 : Eléments constitutifs des barrages

Chapitre 5 : Impacts des barrages

Chapitre 6 : Usage des eaux de barrage

Mode d'évaluation : CONTINU

Références (Livres et photocopiés, sites internet, etc).

SINNIGER R.O., HAGER W. H. : Constructions hydrauliques : Ecoulements stationnaires, Traité de Génie Civil, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Presse polytechnique et universitaire romanes (1989).

VAILLANT J. R. (1977), Croissance et gestion des ressources en eau, Eyrolles, Collection BCEOM, Paris, 246 p.

BENEDETTI - CROUZET E., DUSSART B. (1979,) Les retenues d'eau. Création, évolution impacts surveillance, synthèse bibliographique, Agence financière de bassin Seine- Normandie, Paris, et Institut du bassin de la Dordogne, Sarlat, 246 p.

BERNIER J. (1965), L'application du calcul des probabilités aux problèmes d'exploitation des réservoirs, La Houille Blanche, Grenoble, 5, p. 431-443.

DURAND-DASES F. (1977), Systèmes d'utilisation de l'eau dans le monde, Edition SEDES-CDU, Paris, 182 p.

GOBLOT H. (1979), Les qanats, une technique d'acquisition de l'eau, Mouton, Paris, 236 p.

Table des matières

Avant propos

Programme du cours

Sommaire

| | | |
|------|--|----|
| I. | GENERALITES SUR LES EAUX DE SURFACE | 3 |
| 1 | Les différents écosystèmes aquatiques continentaux : | 3 |
| 1.1 | - Lacs | 3 |
| 1.2 | - Les étangs : | 3 |
| 1.3 | - Marais : | 4 |
| 1.4 | - Marécage : | 4 |
| 1.5 | - Rivière : | 4 |
| 1.6 | - Estuaire : | 4 |
| | - | |
| II. | CARACTERSITQUES ET PROPRIETES DE L'EAU | 5 |
| 1 | Caractéristiques de l'eau : | 5 |
| 2 | Les propriétés de l'eau : | 6 |
| 2.1 | - Un liquide mobile | 6 |
| 2.2 | - Un formidable solvant | 6 |
| 2.3 | - Une chaleur spécifique élevée | 6 |
| 2.4 | Une chaleur latente de fusion et de vaporisation élevées. | 7 |
| 2.5 | Des variations de densité importantes. | 7 |
| 2.6 | Une transparence, certes, mais seulement dans le spectre visible | 7 |
| 2.7 | Une constante diélectrique élevée | 8 |
| 2.8 | Une molécule particulièrement stable. | 8 |
| 2.9 | Une molécule à part. | 8 |
| 2.10 | Le support du pH. | 8 |
| 2.11 | Propriétés biologiques de l'eau | 8 |
| III. | LE CYCLE HYDROLOGIQUE | 9 |
| 1 | Définition et composantes | 9 |
| 2 | Le bilan hydraulique de l'Algérie | 10 |
| VI. | LE BASSIN VERSANT | 11 |
| 1. | Délimitation du bassin versant : | 11 |
| 2 | Caractéristiques géométriques : | 13 |
| 2.1 | - Aire et périmètre : | 13 |
| 2.2 | - Indice de compacité | 13 |
| 2.3 | - Le rectangle équivalent : | 13 |
| 3 | Caractéristiques topographiques: | 14 |
| 3.1 | - Le relief : | 14 |
| 3.2 | - Les pentes | 14 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4 | Les caractéristiques du réseau hydrographiques : | 16 |
| 4.1 | - Classification de HORTON : | 17 |
| 4.2 | - Classification de SCHUMM : | 17 |
| 5 | La densité de drainage : | 17 |
| V | LES ECOULEMENTS SUPERFICIELLES | 18 |
| 1 | Le jaugeage : | 18 |
| 1.1 | - Les principales méthodes : | 18 |
| 1.1.1 | o Les méthodes volumétriques : | 19 |
| 1.1.2 | o Les méthodes d'exploration du champ de vitesse : | 19 |
| 1.1.3 | o Les méthodes physiques : | 20 |
| 1.1.4 | o Les déversoirs : | 21 |
| 1.1.5 | o Formule de Chézy-Manning : | 21 |
| 2 | les crues | 22 |
| 2.1 | - Terminologie | 22 |
| 2.2 | - L'hydrogramme | 22 |
| 2.3 | - Caractéristiques des crues | 23 |
| 2.4 | - Eventualité des crues | 24 |
| VI | LES BARRAGES | 26 |
| 1 | Techniques de construction : | 26 |
| 2 | Elément de calcul : | 26 |
| 3 | Type des barrages : | 27 |
| 3.1 | - Barrage en béton : | 27 |
| 3.1.1 | o Barrage poids : | 27 |
| 3.1.2 | o Barrage Voûte : | 28 |
| 3.1.3 | o Barrage contreforts ou multivoûtes : | 29 |
| 3.2 | - Barrage souple (semi-rigide) : | 31 |
| 3.2.1 | o Barrage en remblai : | 31 |
| 3.3 | - Barrage mobile : | 32 |
| 3.3.1 | o Barrage à aiguilles : | 32 |
| 3.3.2 | o Barrage mobile à battant : | 33 |
| 3.3.3 | o Barrage mobile à clapets : | 33 |
| 3.4 | - Autres types de barrages : | 34 |
| 4 | Fonctions d'un barrage : | 35 |
| 4.1 | - Etanchéité : | 35 |
| 4.2 | - Stabilité | 35 |
| 5 | Travaux d'injection d'étanchéité sous les digues des barrages : | 35 |
| 5.1 | - Définition du procédé : | 35 |
| 5.2 | - Les milieux naturels injectables : | 35 |
| 5.3 | - Les techniques d'injection : | 26 |
| 5.3.1 | o Injection dans les milieux fissurés : | 26 |
| 5.3.2 | o Injection des milieux pulvérulents : | 36 |
| 5.4 | - Type des coulis : | 37 |
| 5.4.1 | o Les coulis newtoniens : | 37 |
| 5.4.2 | o Les coulis binghamiens : | 38 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.5 | - Les domaines d'application : | 38 |
| 5.6 | - Phénomènes caractéristiques de l'injection : | 38 |
| 6 | Impact des barrages sur l'environnement : | 40 |
| 6.1 | - Impact sur les écosystèmes et la biodiversité : | 40 |
| 6.2 | - Impact sur le régime hydrologique : | 40 |
| 6.3 | - Impact sur la qualité de l'eau : | 40 |
| 6.4 | - Impact sur la sédimentation : | 40 |
| 7 | Usage des barrages | 41 |
| 7.1 | - Distribution de l'eau pour usage domestiques et industriels : | 41 |
| 7.2 | - L'irrigation : | 41 |
| 7.3 | - Hydro-électricité : | 41 |
| 7.4 | - Navigation et les activités de loisirs : | 41 |
| 7.5 | - Contrôle des crues : | 41 |
| 7.6 | - L'aquaculture : | 41 |
| | - | |
| VII | AUTRES TECHNIQUES DE MOBILISATION DES EAUX DE SURFACE | 42 |
| 1 | - Les boulis : | 32 |
| 2 | - Les bâches à eau : | 43 |

Références bibliographiques

44

SAHLA MAHLA

المصدر الأول للطالب الجزائري



I. GENERALITES SUR LES EAUX DE SURFACE

Le terme eau de surface (ou dans certaines références « eau continentale non souterraine ») désigne toutes les eaux naturellement ouvertes sur l'atmosphère, y compris les fleuves, les rivières, les lacs, les réservoirs, les ruisseaux, les lacs de barrage, les mers, les estuaires, etc. qui peuvent être douces, saumâtres ou salées. Le terme s'applique également aux sources, aux puits et autres collecteurs d'eau qui subissent directement l'influence des eaux superficielles. Il s'agit donc de toute l'eau captée dans les dépressions de surface, des plus petites, dues à la rugosité du sol, aux plus grandes plaines inondées, lacs, marais, étangs, etc., et est désignée comme le stock d'eau de surface (fig N°1).

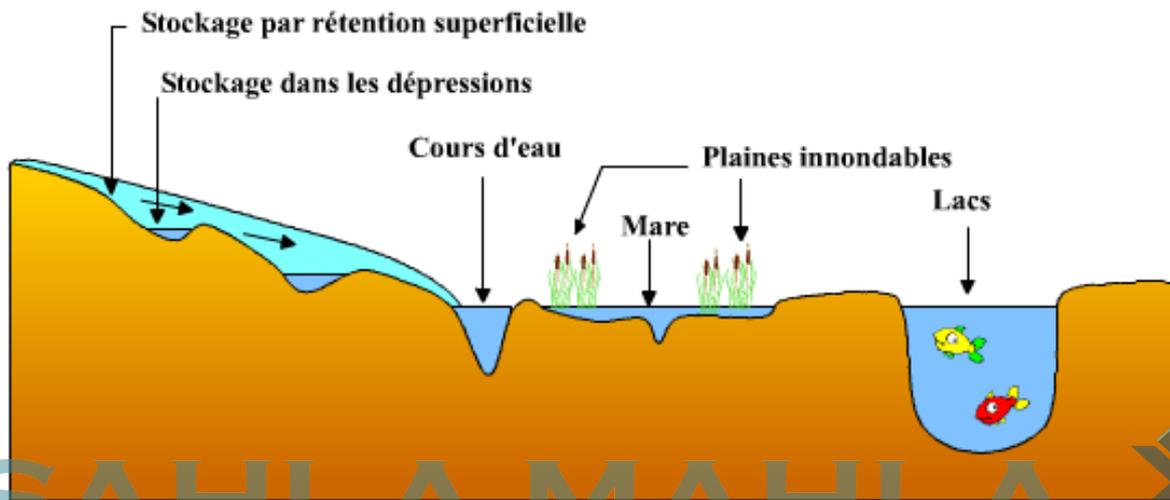


Fig. 1 : Formes des eaux de surface

1 Les différents écosystèmes aquatiques continentaux :

1.1 Lacs

On désigne sous ce terme un ensemble d'écosystèmes aquatiques, généralement d'eau douce, occupant le fond d'une dépression ou d'un bassin géologique sans communication directe avec la mer (à la différence des lagunes).

Les lacs sont caractérisés par des eaux calmes par suite de l'absence de courant gravitaire (dits de ce fait lenticque) et donc renouvellement lents, le temps de demi-vie des eaux ayant tendance à augmenter avec le volume du lac (Ramade, 1998)..

Ainsi qu'on désigne sous le nom de lacs des étendues d'eau dont la profondeur est supérieure à une dizaine de mètres, ce qui permet l'installation d'une stratification thermique, du moins dans certaines périodes de l'année (Dajoz, 2006)..

On peut aussi considérer un lac comme un bassin naturel de décantation dont la période de rétention est longue. Les caractéristiques des eaux de lac varient très lentement au cours de l'année, à l'exception de deux courtes périodes au printemps et à l'automne (Desjardins, 1997)..

1.2 Etangs :

Ecosystèmes lenticques artificiels créés par endigage. En règle générale les étangs sont créés en barrant l'émissaire d'une rivière ou d'un marécage palustre préexistant, ce qui accroît la superficie de la zone humide considérée (Ramade, 1998).

Un étang est une pièce d'eau dont la profondeur est, sous nos latitudes, inférieure à 10 m, mais où l'énergie cinétique du vent est, en toute saison, susceptible de provoquer un brassage total de la colonne d'eau. Ceci implique une remontée permanente des éléments minéraux en provenance des zones profondes vers la zone trophogène (Faurie et al, 2003).

1.3 Marais :

Ecosystème limnique dans lequel la profondeur d'eau est faible. Ils comportent plusieurs types d'habitats. Ces derniers sont conditionnés par l'existence d'écotopes ayant leurs propres particularités définies par la nature locale des facteurs écologiques. Les marais, associés à des peuplements de végétaux palustres qui leur sont inféodés, représentent autant d'habitats distincts.

Drainés depuis l'époque romaine, les marais représentent cependant en tant que tels des milieux de la plus grande importance écologique. En particulier, ils jouent le rôle de régulateur du cycle de l'eau retenant les volumes en excès lors des précipitations et les restituant ensuite lentement aux cours d'eau et aux nappes phréatiques.

Par ailleurs, les marais présentent une productivité primaire et secondaire considérable et revêtent souvent de ce fait un grand intérêt pour l'exploitation des pêcheries continentales (Ramade, 1998).

1.4 Marécage :

Terme d'écologie limnique pris souvent comme synonyme du marais. Ils correspondent à des biotopes lenticques de faible profondeur, donc dépourvus de zone limnétique présentant une zone limosale étendue pouvant s'assécher temporairement. Par ailleurs, il résulte de l'alternance de périodes d'inondation et d'exondation une mosaïque complexe d'écotopes et d'écotones propre tant aux marécages qu'aux marais (Ramade, 2002).

Le marécage, proprement dit, peut être porteur de végétation, buissons ou arbustes qui, inclinés dans une direction ou dans une autre parce que le terrain qui les porte n'est pas stabilisé, constituent des « forêts ivres ».

Près des côtes et des estuaires, le marécage est imbibé d'eau saumâtre : là se forment les marais salants, peuplés d'herbes compactes qui supportent le sel marin, et d'où émergent de petites éminences vert-émeraude (Goldsmith et al. 1990).

1.5 Rivière :

Section d'un cours d'eau correspondant à la zone du rhithron. De ce fait, elle possède une pente moyenne et encore suffisante pour permettre une bonne oxygénation des eaux. Ce terme est aussi utilisé pour désigner des cours d'eaux de faible longueur et de débit moyen modeste (Ramade, 1998).

1.6 Estuaire :

Zone extrême du cours inférieurs d'un fleuve au niveau de laquelle ce dernier se jette dans la mer. En règle générale, un estuaire correspond à un écotone car on y rencontre des espèces pouvant appartenir à l'un ou à l'autre des écosystèmes.

Les estuaires sont des biotopes présentant une forte productivité biologique, leurs eaux chargées d'éléments minéraux nutritifs ont donc un caractère d'eutrophie marquée (Ramade, 1998).

On appelle estuaire la zone, à l'embouchure d'un fleuve, où l'eau douce rencontre l'eau salée de la mer. Au gré du flux et du reflux des marées, les estuaires changent sans cesse de forme ; ce ne sont plus tout à fait des fleuves, mais ce n'est pas encore la mer.

II. CARACTERISTIQUES ET PROPRIETES DE L'EAU

1. Caractéristiques de l'eau :

L'eau est constituée de deux petits atomes d'hydrogène couplés à un atome plus grand d'oxygène. Les deux atomes d'hydrogène ne sont pas situés en vis-à-vis l'un de l'autre mais d'un côté de l'atome d'oxygène (Figure N°2). Chacun d'entre eux portant une charge positive, il résulte de cette disposition particulière que, si la molécule est globalement électriquement neutre, elle constitue un dipôle électrique positif d'un côté et négatif de l'autre. Cette polarisation de la molécule d'eau est à l'origine de plusieurs de ses propriétés, en particulier de l'organisation que les molécules vont adopter à l'état liquide.

Sur la terre, l'eau existe dans les trois états : liquide (eau proprement dite), solide (glace) gazeux (vapeur d'eau). Ces trois phases coexistent dans la nature, toujours observables deux à deux, et plus ou moins en équilibre : eau- glace, eau- vapeur, glace- vapeur selon les conditions de température et de pression.

Selon leur état, les molécules d'eau vont s'organiser de manière différente. Sous la forme **liquide**, elles sont liées entre elles en adoptant un plan moins lâche que sous la forme **solide** (Figure N° 2). La conséquence est la plus faible densité de l'eau solide par rapport à l'eau liquide : la glace flotte sur l'eau. Notre système de banquise actuel résulte de cette propriété. Cette propriété assure également la permanence du milieu liquide même dans le cas de basses températures qui amènent la surface d'un lac ou d'une mer à geler.

La polarisation et les liaisons entre les molécules vont également donner à l'eau ses propriétés de réactivité vis-à-vis des autres éléments et sa capacité à les dissoudre et donc à les transporter. L'eau est donc un **solvant** particulièrement efficace et le vecteur privilégié de tous les échanges du monde vivant, soit sous forme liquide, soit sous forme gazeuse. (Richard T. Wright, Bernard J. Nebel, 2002)

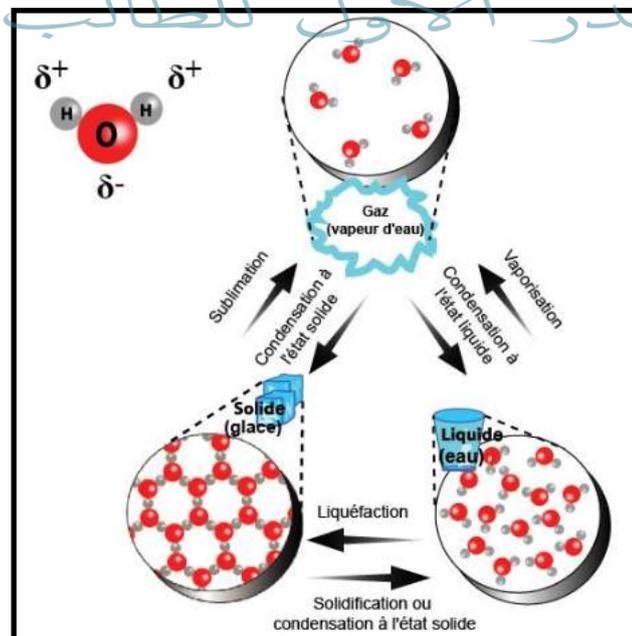


Fig. 2 : Structure de la molécule de l'eau, d'après Nebel B. & Wright R.

2. Les propriétés de l'eau.

2.1. Un liquide mobile.

L'eau est un corps continu, sans rigidité, qui coule facilement, remplit tous les interstices, puis s'étale en surface.

L'eau possède un fort pouvoir mouillant qui lui donne des propriétés capillaires particulièrement importantes, par exemple, pour comprendre son comportement dans les sols. En outre, sa viscosité, très variable selon sa composition chimique ou sa température, est à l'origine de caractéristiques de miscibilité remarquables. Par exemple des courants marins chauds ou froids ne se mélangent guère avec les eaux voisines dont la température est différente.

2.2. Un formidable solvant.

L'eau est le plus formidable solvant naturel à la surface de la terre. L'eau est capable de dissoudre quasiment n'importe quel substrat, au point que l'on peut affirmer que l'eau pure n'existe pas puisque le flacon qui pourrait la contenir, sans être un peu dissous par elle, n'a pas encore été inventé.

Les eaux de pluies, pourtant issues essentiellement de l'évaporation de l'eau de mer, donc douces, se chargent de minéraux dans l'atmosphère. Leur teneur totale en sels dissous voisine les 7 g / m³. Quand les pluies ruissellent ou s'infiltrent dans le sous-sol, leurs eaux se chargent de tous les minéraux ou de toutes les matières organiques qu'elles croisent, y compris des substances polluantes ou toxiques. C'est ainsi qu'en moyenne, les eaux de rivières ont une charge en sels dissous de l'ordre de 120 g / m³.

| Eaux concentration en sels dissous en g/m ³ | Na ⁺ | K ⁺ | Mg ⁺⁺ | Ca ⁺⁺ | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ⁻⁻ | SiO ₂ |
|--|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Eau de pluie environ 7 g/m ³ | 1.7 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 3.7 | 0.2 | 0.5 | 0 |
| Eau des rivières environ 120 g/m ³ | 8 | 3 | 5 | 12 | 9 | 60 | 10 | 13 |
| Eau de mer environ 35 000 g/m ³ | 11 000 | 400 | 1200 | 500 | 19 000 | 200 | 2700 | 0 |

Ce sont ces eaux qui sont à l'origine de la salinité des eaux de mer, laquelle est de l'ordre de 35000 g / m³, soit près de 300 fois plus que les eaux douces.

Tous ces minéraux et substances organiques dissous sont des nutriments ou des oligoéléments indispensables aux organismes photosynthétiques (algues, plantes, phytoplancton, cyanobactéries, etc.) pour leur production primaire.

2.3. Une chaleur spécifique élevée.

L'eau est l'élément naturel (à part l'ammoniaque NH₄⁺) dont la chaleur spécifique est la plus élevée sur terre. La chaleur spécifique étant la quantité d'énergie qu'il faut fournir à une masse

d'eau donnée pour élever sa température de 1° C, cela revient à dire que l'eau est difficile à chauffer, tout autant qu'elle est difficile à refroidir. La température d'ébullition est anormalement élevée par rapport aux composés de masse moléculaire du même ordre et possédant plusieurs atomes d'hydrogène. Dans les conditions normales elle est de 100°C.

On peut dire qu'en dehors des couches les plus superficielles, l'Océan mondial constitue essentiellement un hydrosystème froid. D'autre part, les masses d'eau continentales d'importance jouent un rôle important pour l'établissement de climats locaux.

2.4. Une chaleur latente de fusion et de vaporisation élevées.

Les chaleurs latentes de fusion et de vaporisation représentent les quantités de chaleur qu'il faut fournir soit pour fondre de la glace, soit pour produire de la vapeur d'eau. L'énergie nécessaire est prélevée sur le substrat, cela revient à dire, par exemple, que si la majeure partie de la vapeur d'eau atmosphérique vient de l'océan, celui-ci est constamment refroidi par ce mécanisme de vaporisation.

Ces deux caractéristiques expliquent en grande partie pourquoi les hydrosystèmes, surtout océaniques, mais aussi continentaux, se comportent comme de formidables tampons thermiques et pourquoi la température à la surface de la terre varie dans des proportions réduites.

2.5. Des variations de densité importantes.

L'eau présente un maximum de densité pour une température proche de +4° C. Cela revient à dire que les eaux des fonds des océans sont à une température de +4° C. Cela est vrai partout, sauf dans les Océans glaciaux pour la raison essentielle que leurs eaux n'atteignent pas cette température. C'est aussi la température des eaux au fond des lacs localisés dans des régions tempérées ou froides.

Lorsque des eaux superficielles se trouvent refroidies jusqu'à cette température de +4° C, elles deviennent plus lourdes que les eaux qui les supportent et vont donc couler vers les fonds. Ce phénomène est très important, en particulier pour les eaux continentales, puisqu'il assure le mélange des eaux, mélange qui a lieu une ou deux fois par an (lacs monomictiques ou lacs dimictiques).

La glace, parce qu'elle flotte, joue un rôle fondamental en empêchant la pénétration du froid dans les masses profondes d'eaux soumises à des grands froids.

2.6. Une transparence, certes, mais seulement dans le spectre visible.

Si l'eau apparaît incolore, c'est parce qu'elle est transparente dans le spectre visible. Les grandes masses d'eau absorbent les infrarouges sur quelques mètres d'épaisseur. C'est la raison essentielle qui fait que seules les couches les plus superficielles des eaux s'échauffent. Il en va de même pour la vapeur d'eau atmosphérique laquelle de ce fait limite largement la pénétration des infrarouges. C'est une des raisons qui expliquent que les écarts de température entre l'hiver et l'été sont plus limités dans les régions soumises à l'influence océanique que dans les régions continentalisées (éloignées de l'océan).

Les eaux restent transparentes sur des profondeurs importantes pour les verts et les bleus. C'est une des raisons qui expliquent pourquoi les lacs ou les océans, surtout si leurs eaux sont limpides, sont verts (moins profonds) ou bleus (plus profonds). Les eaux ne sont transparentes

aux radiations utiles pour la photosynthèse que sur une épaisseur qui varie, en moyenne, de 10 à 50 mètres (zone euphotique).

2.7. Une constante diélectrique élevée.

La constante diélectrique élevée de l'eau explique pourquoi les substances qu'elle dissout facilement se retrouvent fréquemment sous forme d'ions.

2.8. Une molécule particulièrement stable.

L'énergie de formation de la molécule d'eau, 242kJ/mol, est élevée. Il s'ensuit que la molécule d'eau est particulièrement stable pour la raison que les atomes d'hydrogène et l'atome d'oxygène qui la constituent mettent chacun en commun un électron pour établir leur liaison. De fait, les atomes d'hydrogène possèdent deux électrons et celui d'oxygène possède huit électrons sur sa couche périphérique. C'est cette saturation de la couche externe de la molécule qui lui confère sa grande stabilité.

2.9. Une molécule à part.

Même si la couche électronique externe reste saturée, les électrons ont tendance à migrer vers l'oxygène (O⁻) délaissant l'hydrogène (H⁺). Cette " disponibilité " électronique potentielle rend la molécule d'eau très affine pour de multiples substances qu'elle peut ainsi dissoudre.

En outre, le déséquilibre électronique a pour effet de rendre possible des liaisons entre l'atome d'hydrogène d'une molécule avec l'atome d'oxygène d'une autre molécule (liaison hydrogène). En réalité, une molécule d'eau s'entoure de quatre autres molécules constituant un tétraèdre dont les atomes d'oxygène occuperaient les sommets.

Cette liaison hydrogène, faible au regard de la liaison covalente, est suffisamment forte pour qu'aux basses températures, l'arrangement " cristallin " en tétraèdre soit permanent dans la glace et se maintiennent partiellement dans l'eau liquide. À partir de 25 - 30° C, les liaisons hydrogène perdent grandement de leur efficacité, jusqu'à ne plus exister dans l'eau chaude ou bouillante et naturellement dans la vapeur.

C'est l'existence de cette liaison hydrogène qui explique pourquoi il faut fournir beaucoup d'énergie pour vaporiser l'eau, puisque avant qu'elle le puisse, il faut d'abord casser ces liaisons dites faibles.

2.10. Le support du pH.

Il arrive qu'un atome d'hydrogène d'une molécule d'eau soit capté par un atome d'oxygène d'une autre molécule. Deux molécules d'eau vont donc donner naissance à un ion OH⁻ et à un autre H₃O⁺ (hydronium). Dans l'eau pure, il y a le même nombre d'ions OH⁻ et H₃O⁺. Mais qu'une substance dissoute apporte un excès d'ions OH⁻, la solution devient basique ; qu'une autre substance apporte un excès d'ions H₃O⁺, la solution devient acide.

Le pH traduit la concentration d'ions H₃O⁺ dans une solution : 0 à 7, acide ; 7 neutre ; 7 à 14 basique ou alcalin.

2.11. Propriétés biologiques de l'eau

L'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone contribuent à créer des conditions favorables au développement des être vivants. Il existe un cycle biologique, cycle au cours duquel s'effectue une série d'échanges ; l'eau entre pour une grande part dans la constitution des êtres vivants. (J-C. Boeglin, 2001).

III. LE CYCLE HYDROLOGIQUE

1. Définition et composantes :

Le cycle hydrologique décrit le constant mouvement de l'eau sur et sous la surface de la terre. L'eau passe des états solides, liquides et gazeux dans ce cycle. La condensation, l'évaporation et la solidification se produisent lors de variations climatiques. L'énergie solaire est la source d'énergie du cycle qui permet une évaporation (**E**) intense à la surface des océans et à moindre niveau à la surface des continents. A cette action vient s'ajouter la transpiration des plantes. La transpiration et l'évaporation sont souvent regroupées en un seul terme appelé l'évapotranspiration (**E.T.P**). La gravité complète le cycle en ramenant les précipitations (**P**) sur la surface puis dans les ruissellements (**R**). Quand elle s'infiltré (**I**) dans le sol, l'eau rencontre différentes régions (figure N°3) : (F.Renard, 2007)

La zone non saturée (ZNS) où les pores sont remplis partiellement d'eau et partiellement d'air.

La frange capillaire où l'eau remonte de la zone saturée vers la zone non saturée. Cette région correspond à la partie inférieure de la zone sous saturée.

La zone saturée (ZS) (phréatique).

Le bilan d'eau englobant ces termes s'exprime comme suit :

$$P=E+R+I$$

P : Précipitations

E : Evaporation et transpiration (E.T.P)

R : Ruissellement

I : Infiltration

SAHLA MAHLA
المصدر الاول للطالب الجزائري

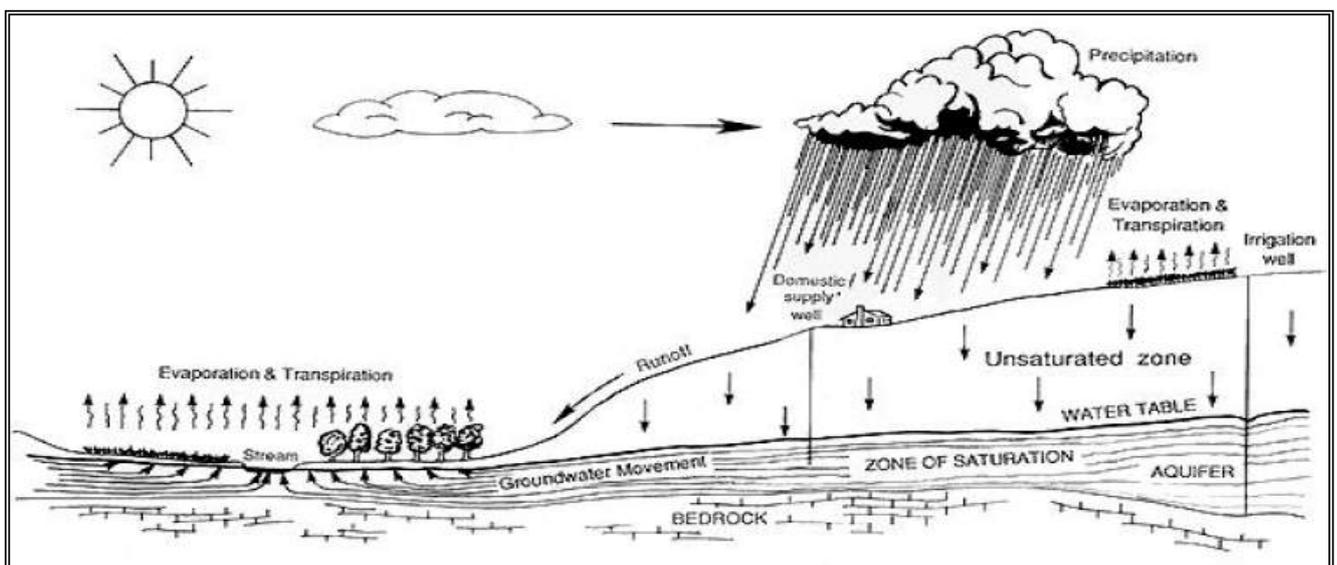


Fig. N° 3 : Schéma représentant les différentes étapes du cycle hydrologique

Le bilan de l'eau peut être établi approximativement sur l'ensemble du globe, tableau suivant : (A.Sari, 2002)

| LIEUX | VOLUMES (1 000 km ³) | POURCENTAGE DU VOLUME TOTAL |
|--------------------------------------|--|--------------------------------|
| Lacs d'eau douce | 125 | 0,620 |
| Rivières | 1.25 | |
| Humidité du sol | 65 | |
| Eaux souterraines | 8 250 | |
| Lacs salés | 105 | 0,008 |
| Atmosphère | 13 | 0,001 |
| Calotte glaciaire, glaciers et neige | 29 200 | 2,100 |
| Mers et océans | 1 320 000 | 97,250 |
| Total | 1 360 000 ou 1,36x10 ¹⁸ m ³ | 100,000 |

2. Le bilan hydraulique de l'Algérie : (A.Sari, 2002)

Pour notre pays, le bilan s'établit comme suit : pour une superficie totale de 2,38 millions de km², la pluviométrie n'intéresse que 10 % de cet espace, qui se divise approximativement en trois zones:

- **La zone septentrionale :**

D'une superficie de 130 000 km², elle reçoit, en moyenne 500 mm/an, ou $13 \times 10^{10} \times 0.5 = 65 \times 10^9$ m³ (65 milliards de m³).

- **La zone des Hauts Plateaux :**

D'une superficie de 76 000 km² avec 300 mm/ an en moyenne, ou $76 \times 10^9 \times 0.3 = 22.8$ milliards de m³

- **La zone Sud Atlas :**

D'une superficie de 67 000 km², avec 250 mm/an ou $67 \times 10^9 \times 0.25 = 16.75$ milliards de m³.

Globalement donc, le pays reçoit 100 milliards de m³ de pluie par an, dont 85 % s'évaporent (85 milliards de m³) Devant cette évaporation, l'homme est impuissant. Les 15 milliards restant s'écoulent dans les cours d'eau et vers la mer, ou s'infiltrent dans les nappes souterraines.

Les quantités d'eau mobilisables économiquement (car si le prix de l'eau dépasse un certain seuil, jugé trop élevé, on renonce à mobiliser l'eau à ce prix-là et l'on cherche une autre source d'eau à mobiliser à moindre coût; ou bien l'on réduit les volumes utilisés en gaspillant moins) pour les différentes usages de la population sont évaluées à :

- * 5.7 milliards de m³ en eaux de surface.
- * 1.8 milliards de m³ en eaux souterraines dans le Nord.
- * 4.9dans le Sud.

soit un total de 12.4 milliards de m³

IV. LE BASSIN VERSANT

Introduction :

Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.

Plus précisément, le bassin versant qui peut être considéré comme un " système " est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.

Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau, est donc défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est entièrement caractérisé par son exutoire, à partir duquel nous pouvons tracer le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite. (A. Musy, 2005)

1. Délimitation du bassin versant :

La ligne de crête d'un bassin versant est la ligne de partage des eaux. La ligne ainsi définie, limite les bassins versants topographiques adjacents. (fig. 4)

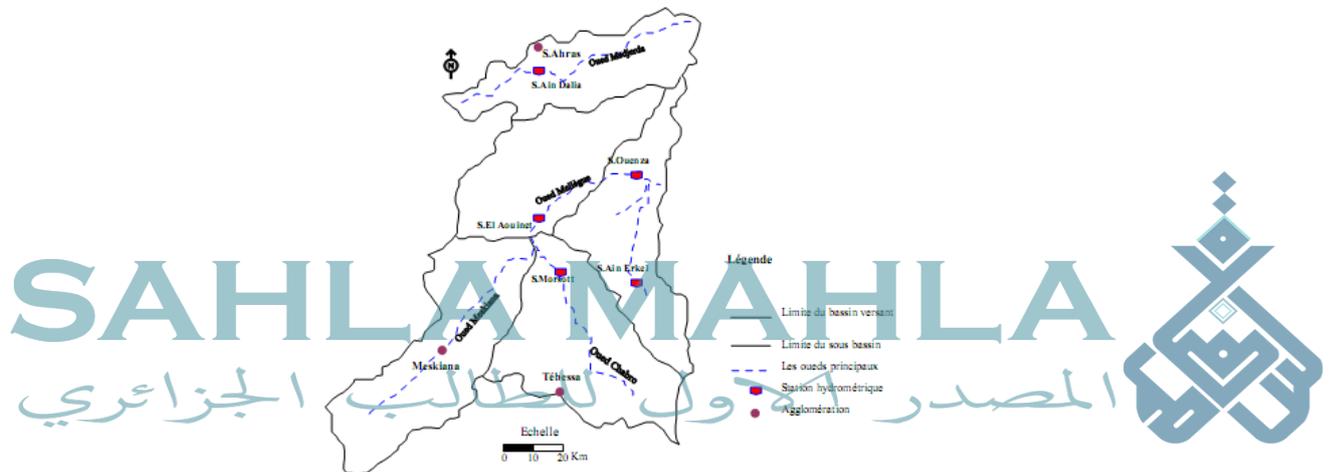


Fig. 4 : Schéma d'un bassin versant (Oued mellègue Algérie)

Toutefois, la délimitation topographique nécessaire à la détermination en surface du bassin versant naturel n'est pas suffisante. Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines (voir Fig. 4 & 5). Le bassin versant est alors différent du bassin versant délimité strictement par la topographie. Il est appelé dans ce cas *bassin versant réel* (hydrogéologique).

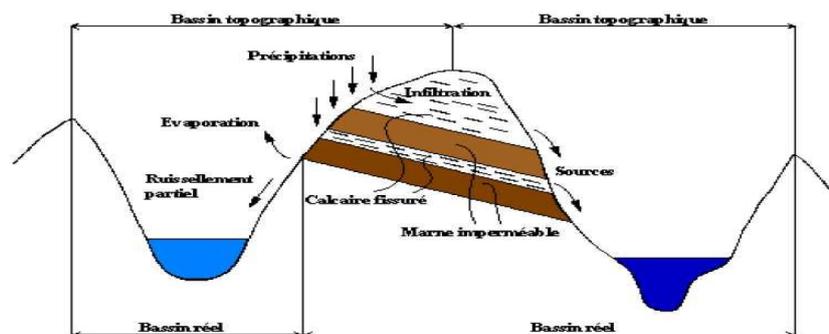


Fig. 4. Bassin versant topographique et bassin versant hydrogéologique (réel)

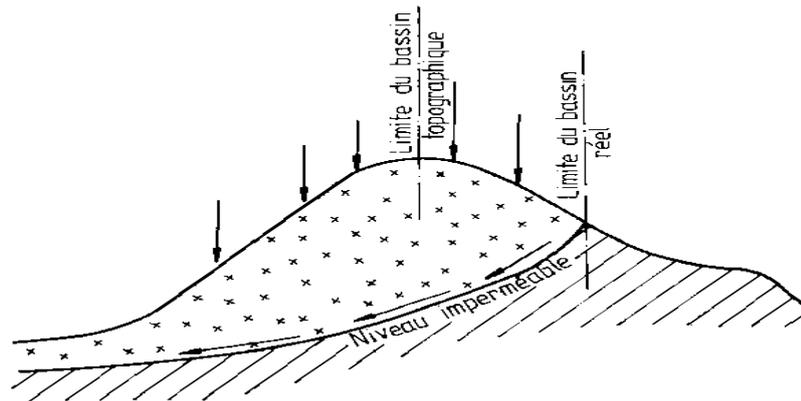


Fig. 5 : Influence de la géologie sur les limites du bassin versant

Cette différence entre bassins réel et topographique est tout particulièrement importante en région karstique. Lorsque l'on s'intéresse au ruissellement, la délimitation du bassin versant doit aussi tenir compte des barrières artificielles (Fig. 6) (routes, chemins de fer, etc.). En effet, l'hydrologie du bassin versant, et notamment la surface drainée, peuvent être modifiées par la présence d'apports latéraux artificiels (réseaux d'eaux usées ou potables, drainages, routes, pompages ou dérivations artificielles modifiant le bilan hydrologique).

Le tracé de la ligne de crête est une opération délicate qui se fait sur la carte topographique de la région concernée. (A. Musy, 2005)

Généralement, on utilise une carte à l'échelle 1/200 000. S'il s'agit d'un petit bassin versant, de l'ordre de quelques Km² on préférera des cartes topographiques au 1/50000, voire au 1/25000, et, si ces documents existent, la couverture de photos aériennes, qui en vision stéréoscopique, restituée et permet un tracé beaucoup plus précis. Une *vérité terrain* est toujours indispensable.

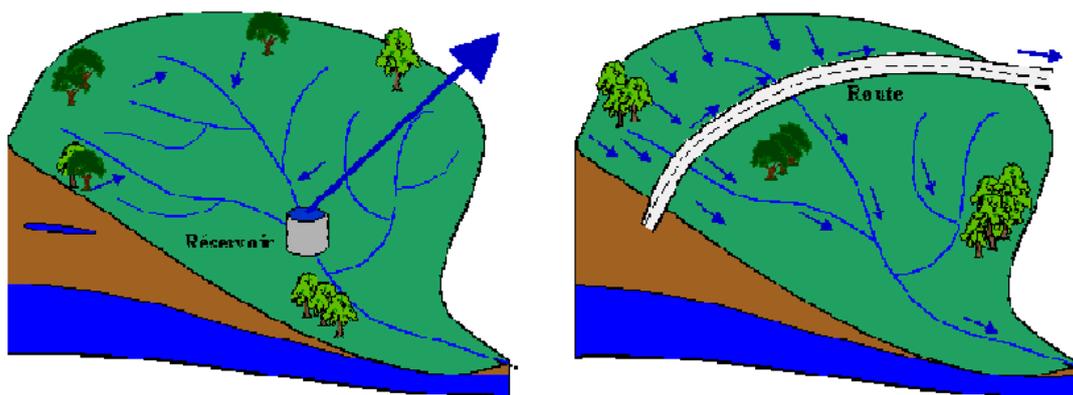


Fig. 6- Exemples de modifications de la délimitation du bassin versant suite à la mise en place d'un réservoir et la construction d'une route

Il convient donc également de définir, en plus des délimitations topographiques, les limites souterraines de ce système. De plus, il est aussi nécessaire de tenir compte des effets anthropiques relatifs aux eaux du système.

2. Caractéristiques géométriques :

2.1 Aire et périmètre :

L'aire est la portion du plan délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin. Sa mesure est faite soit à l'aide d'un planimètre, soit par la méthode des petits carrés, et est généralement exprimée en Km².

Le périmètre est la longueur, généralement exprimée en km, de la ligne de contour du bassin; sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre. Pour certaines applications on trace le périmètre stylisé du bassin en lissant son contour. (A. Musy, 2005)

2.2 Indice de compacité

L'indice admis par les hydrologues pour caractériser la forme d'un bassin versant est l'indice de compacité de GRAVELIUS, 1914, qui est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface.

Si « S » est la surface du bassin en et P son périmètre en km, le coefficient est égal à :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Le coefficient K_c est supérieur à 1 et d'autant plus voisin de cette valeur que le bassin est compact (fig. N°7).

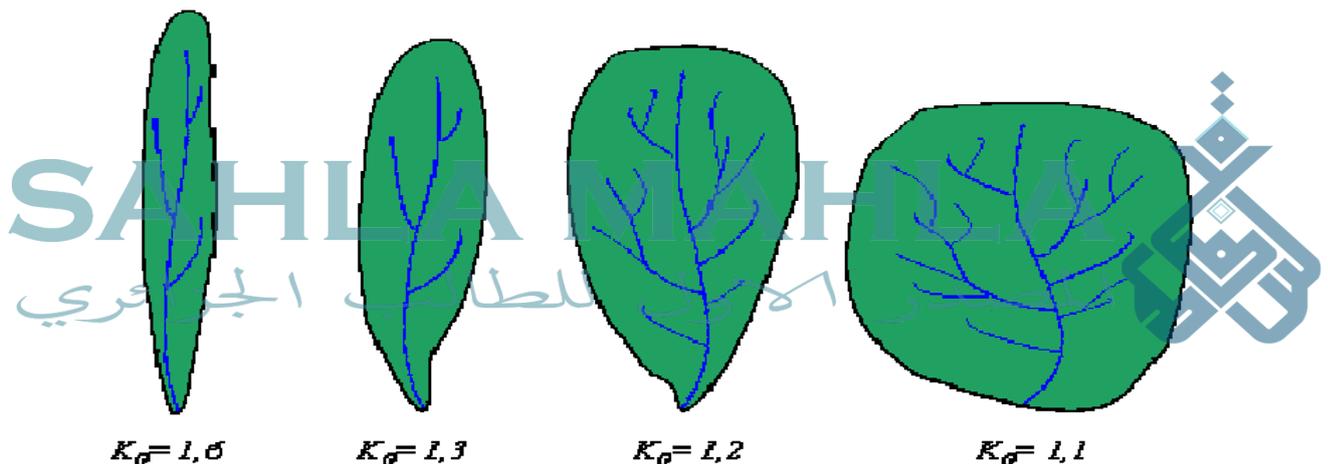


Fig. 7: Exemples d'indices de compacité

2.3 Le rectangle équivalent :

Cette notion a été introduite pour pouvoir comparer des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

Soit L et l la longueur et la largeur du rectangle, et P et A le périmètre et l'aire du bassin versant (M. Roche, 1963)

On a:

$$K_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{S}}; \text{ et } P = 2(L + l)$$

Par conséquent l'on a :

$$P = \frac{K_c \sqrt{S}}{0,282} = 2(L + l),$$

Ce qui donne

$$2(L + l) - \frac{K_c \sqrt{S}}{0,282} = 0 .$$

En multipliant cette équation par L, l'on obtient :
C'est-à-dire :

$$2L^2 + 2L \cdot 1 - \frac{K_c \sqrt{S}}{0,282} L = 0$$

$$2L^2 - \frac{K_c \sqrt{S}}{0,282} L + 2S = 0$$

Qui est une équation du second degré en L de type $ax^2+bx+c=0$ dans laquelle :

$$a = 2, \quad b = \frac{-K_c \sqrt{S}}{0,282}, \quad \text{et } c = 2S. \quad \text{En remplaçant on obtient:}$$

$$L = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right) \quad \text{et} \quad l = \frac{K_c \sqrt{S}}{1,12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right)$$

Ayant déterminé les dimensions du rectangle équivalent, l'on détermine la répartition des courbes de niveaux, en utilisant la courbe hypsométrique tracée précédemment, ou bien en mesurant la surface à l'aide du planimètre.

3. Caractéristiques topographiques :

3.1 Le relief :

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique.

Elle est tracée sur la figure N°8 en reportant en ordonnée l'altitude Y, et, en abscisse le pourcentage de la surface du bassin dont l'altitude est à supérieure ou égale à Y, rapportée à la surface totale du bassin. La répartition hypsométrique est donnée par le pourcentage de la surface comprise entre les différentes courbes de niveau à la surface totale.

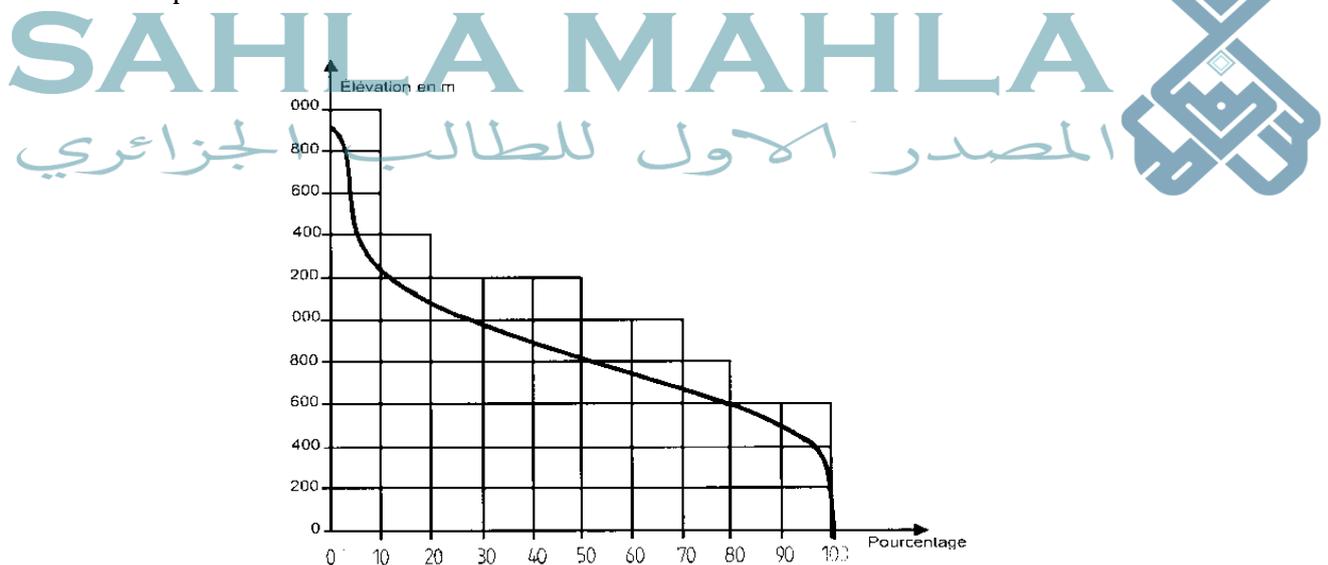


Fig. 8 : courbe hypsométrique

3.2 Les pentes

On peut distinguer 4 types de pentes:

- la pente orographique;
- la pente topographique;
- la pente hydrographique;
- la pente stratigraphique.

Les indices de pentes permettent, comme pour certaines caractéristiques géométriques, de comparer les bassins versants entre eux.

- **Pente orographique.** La pente orographique caractérise le relief. Elle favorise l'élévation des masses d'air en mouvement au dessus des reliefs et provoque la condensation de l'humidité qu'elles contiennent.
- **La pente topographique.** C'est la pente qui influence l'écoulement superficiel des eaux: ruissellement de surface et écoulement hypodermique. Elle accélère le ruissellement sur les versants et détermine en partie le temps de réponse du cours d'eau aux impulsions pluviométriques.

La pente topographique se lit et se mesure sur la carte topographique à grande échelle ($>1/100000$) ou à l'aide de M.N.T.

- **La pente hydrographique.** La pente hydrographique, ou profil en long du cours d'eau, peut-être déterminée sur la carte ou mesurée sur le terrain par un nivellement de précision. Cette pente exprimée généralement en m/km conditionne:
 - la vitesse de l'eau dans le chenal;
 - la vitesse de l'onde de crue;
 - le tirant d'eau de la rivière: pour un même débit et une même largeur une rivière plus pentue a une vitesse d'écoulement plus grande et donc, généralement, une profondeur plus faible.

La pente hydrographique varie plus ou moins irrégulièrement pour un même cours d'eau selon les structures géologiques traversées et diminue en général d'amont en aval (forme concave des profils en long) (fig. 9).

La pente d'un cours d'eau varie beaucoup d'un type de cours d'eau à un autre: supérieures à 10^2 m/km pour les torrents fortement pentus à 10^{-2} m/km pour les grands fleuves. Elle conditionne la forme des hydrogrammes de crue, comme le montre la figure 10.

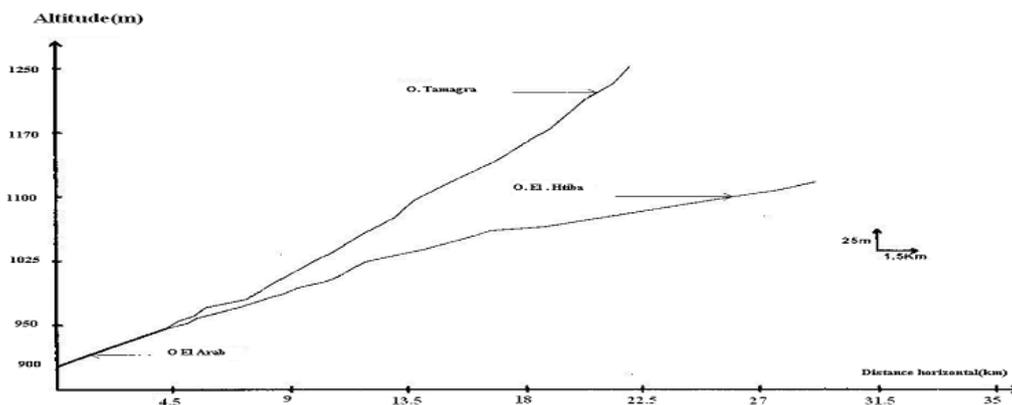


Fig. 9 : Profils en long d'un talweg (Oued El-Arab, Algérie)

- **La pente stratigraphique.** Elle contrôle le chemin des eaux infiltrées qui alimentent les aquifères. Elle détermine la direction de l'écoulement des eaux souterraines.

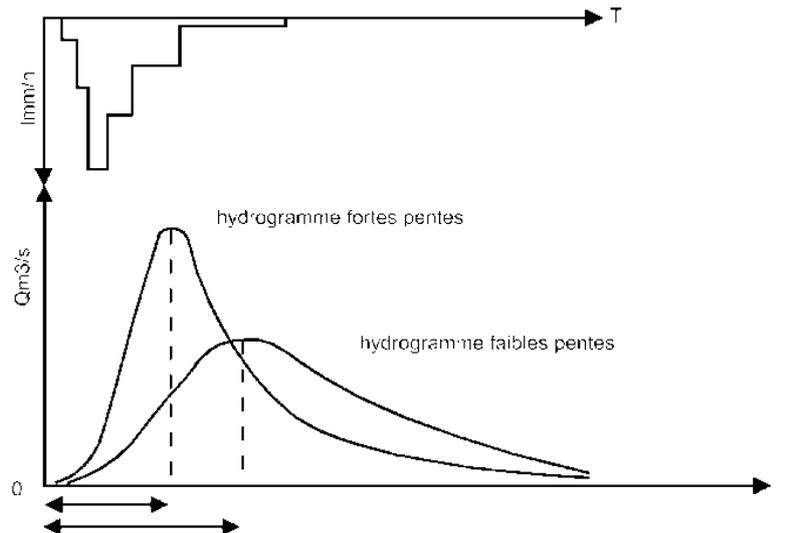


Fig. 10 : Rôle de la pente sur la forme de l'hydrogramme.

Les indices de pente :

- **L'indice de pente Roche:** L'indice de pente de Roche caractérise la pente globale du bassin versant. Il s'exprime par:

$$I_p = L^{-1/2} \cdot \sum_n^1 \sqrt{a_i} \cdot d_j$$

L : Longueur du rectangle équivalent,

Où a_i représente la fraction de la surface S comprise entre deux courbes de niveau voisines distantes de d_j .

- **L'indice global de pente :** Sur la courbe hypsométrique, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de S. On en déduit les altitudes H_5 et H_{95} entre lesquelles s'inscrit 90% de l'aire du bassin et le dénivelée $D = H_5 - H_{95}$.

L'indice global est égal à :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

- **Les modèles numériques de terrain.** Le modèle numérique de terrain est établi à partir des courbes de niveau numérisées du bassin. Les altitudes sont calculées aux points d'une grille dont la taille d'une maille élémentaire détermine le pas du modèle. Différents paramètres sont calculés pour chacune des mailles: altitude moyenne, direction de drainage, pente moyenne, exposition, concavité, convexité etc. Le modèle numérique de terrain permet d'avoir une représentation en 3 dimensions du bassin versant. Il permet surtout d'étudier la distribution des paramètres précédents, de tracer automatiquement le réseau de drainage et de disposer de données descriptives quantifiées et précises pour réaliser une modélisation des écoulements distribuée dans l'espace.

4 Les caractéristiques du réseau hydrographiques :

Le réseau hydrographique est l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant. (J.P. Laborde, 2009)

Un chenal peut-être défini comme l'inscription permanente dans l'espace d'un écoulement concentré plus ou moins permanent. A l'amont de tout chenal, les processus hydrologiques sont aréolaires, spatiaux, c'est-à-dire qu'ils intéressent une surface et non une ligne; dans le chenal ils deviennent linéaires.

Dans un bassin versant les chenaux sont organisés, hiérarchisés en un réseau qui concentre les eaux des rus dans les ruisseaux, celles des ruisseaux dans les rivières, celles des rivières dans les fleuves.

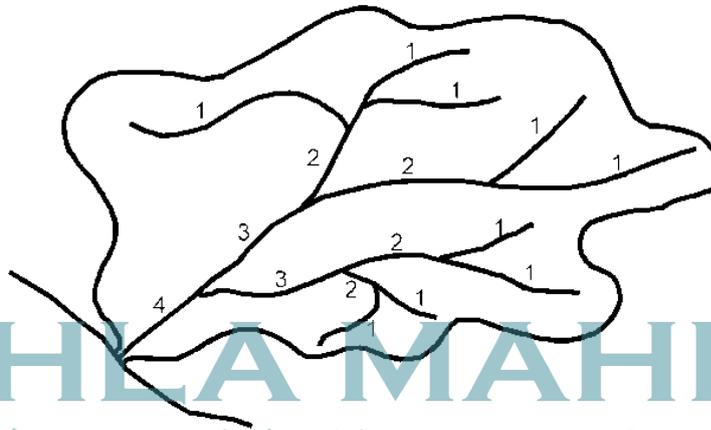
Un réseau hydrographique est donc l'ensemble des cours d'eau, affluents et sous-affluents d'une rivière ou d'un même fleuve. A l'état naturel tous les réseaux sont hiérarchisés, de nombreux auteurs ont proposé des classifications de ces réseaux.

4.1 Classification de HORTON :

Tout cours d'eau sans affluent est d'ordre 1, tout cours d'eau ayant un affluent d'ordre x est d'ordre $x + 1$, et garde cet ordre sur toute sa longueur. A la confluence de deux talwegs d'importance égale, on donne l'ordre supérieur au plus long.

4.2 Classification de SCHUMM : (fig. 11)

Est d'ordre $x + 1$ tout tronçon de rivière formé par la réunion de deux cours d'eau d'ordre x .



SAHLA MAHLA
المصدر الأول للطلاب الجزائري



Fig. 11 : Bassin versant d'ordre 4 (classification de SCHUMM).

5 La densité de drainage :

C'est le quotient de la somme des longueurs de tous les cours d'eau à la superficie du bassin drainé:

La détermination de la densité de drainage suppose d'adopter certaines conventions quant à la définition des chenaux de drainage:

- talwegs nettement marqués et empruntés par des écoulements temporaires sur les rivières non pérennes;
- ou ruisseaux toujours en eau des grands bassins versants.

V. LES ECOULEMENTS SUPERFICIELS

Introduction :

Les principales étapes de l'écoulement sont les suivantes;

Les précipitations tombées sur le sol commencent par la saturation progressive du terrain. Il ne se produit pas d'écoulement ou de ruissellement tant que le taux des précipitations, c'est-à-dire l'intensité des précipitations, ne dépasse pas la capacité d'infiltration du sol. Une fois la saturation est atteinte, l'excès d'eau s'écoule par gravité le long des pentes. Une partie de l'eau qui ruisselle s'accumule d'abord dans les dépressions de la surface, ensuite les emplis puis continue sa course vers l'exutoire.

Le débit à l'exutoire va augmenter avec l'arrivée successive des apports de ruissellement provenant des zones du bassin les plus éloignées. Si l'averse dure suffisamment longtemps, il arrive un moment où l'ensemble du bassin versant "débite" à l'exutoire. Si l'averse est de courte durée, le ruissellement de la partie la plus éloignée du bassin arrive à l'exutoire au cours de la phase décroissante du débit, longtemps après la fin de la pluie.

On appelle " écoulement hypodermique " la partie des précipitations infiltrées qui chemine d'abord quasi-horizontalement dans les couches supérieures du terrain pour réapparaître à l'air libre à la rencontre d'un chenal d'écoulement. L'importance du débit hypodermique dépend de la structure du sol.

La présence d'une couche imperméable à faible distance de la surface du sol favorise ce genre d'écoulement. Il peut atteindre 80% du débit total sur des versants à pente douce (A.Sari, 2002).

Différents types d'écoulement peuvent être définis en considérant certains paramètres qui changent avec le temps et la distance le long d'un élément d'écoulement. On distingue :

- Écoulement permanent ou non permanent
- Écoulement uniforme ou non uniforme
- Écoulement à surface libre (en canal ou en conduite)
- Écoulement laminaire ou turbulent
- Écoulement fluvial ou torrentiel

1. Le jaugeage :

Il n'existe pas de méthode universelle pour la mesure du débit d'un cours d'eau. Le choix d'une méthode est conditionné par divers facteurs. On peut citer:

- la configuration du site et les conditions d'écoulement,
- le matériel de mesure et le temps disponibles,
- le nombre de personnes pouvant participer à la mesure,
- la précision que l'on souhaite obtenir.

Pour la détermination précise d'un débit dans les conditions naturelles, la réalisation effective de mesures sera toujours préférable à l'application de formules hydrauliques.

1.1 Les principales méthodes :

Pour mesurer le débit d'un écoulement «naturel» (cours d'eau, canal, dérivation...), il existe quatre grandes catégories de méthodes:

1.1.1 Les méthodes «volumétriques» qui permettent de déterminer le débit d'après le temps écoulé et le volume de liquide qui a pénétré dans un réservoir jaugé. Le débit ainsi mesuré sera égal à :

$$Q=V/t$$

Compte tenu d'aspects pratiques inhérents à la méthode de mesure (taille du récipient nécessaire, incertitude sur le temps de début et de fin, aménagement spécifique éventuel) cette méthode n'est généralement pratiquée que pour des débits très faibles, quelques l/s au plus. Citons toutefois l'utilisation des volumes d'écluse ou de bief pour certaines mesures spécifiques.



Jaugeage volumétrique

1.1.2 Les méthodes «d'exploration du champ de vitesse» Elles consistent à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée. La mesure de la vitesse est faite grâce à une hélice qui, placée dans le sens de l'écoulement, va tourner grâce à la vitesse de l'eau. Le nombre de tours par minute que fait l'hélice est proportionnelle à la vitesse de l'eau. Les hélices sont testées en laboratoire en vue de définir la relation entre la vitesse de l'eau et celle de l'hélice. Ensuite, grâce à un système de comptage du nombre de tours par unité de temps que fait l'hélice dans le cours d'eau et en utilisant la relation trouvée en laboratoire, on détermine la vitesse de l'eau au point de mesure.

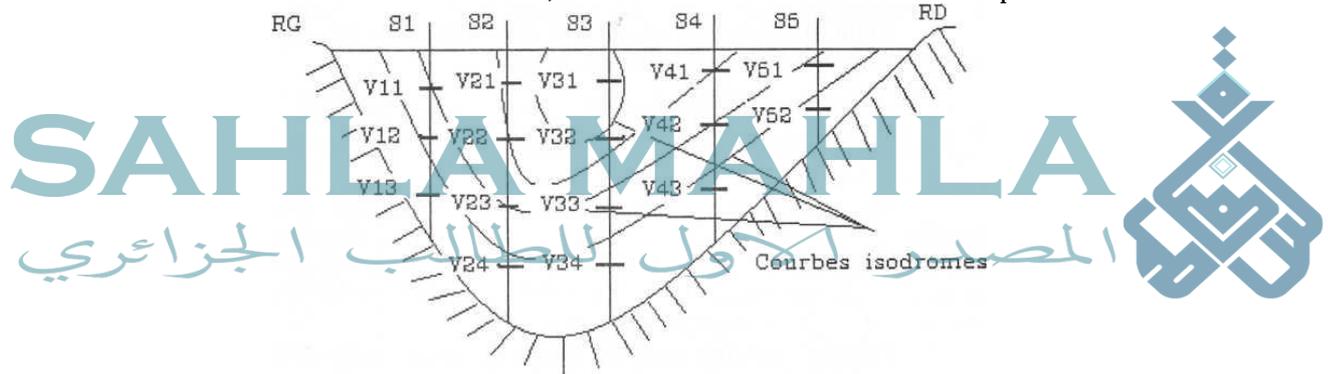
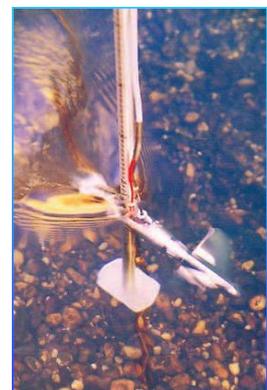


Fig.12 : Champ de vitesse à travers une section d'un oued

Pour les faibles débits, on utilise les moulinets et, pour les débits importants, les saumons dont le poids varie de 5 à 150 kg. Les moulinets et les saumons permettent de transformer le mouvement de rotation de l'hélice en impulsions électriques que l'on peut compter et enregistrer aisément. Après avoir choisi une section accessible de l'oued, on mesure la vitesse de l'eau à des profondeurs différentes, le long de plusieurs verticales bien réparties à travers la section de l'oued. Ainsi on obtient un champ de vitesses (figure 12) grâce auquel on peut calculer le débit par l'intermédiaire de deux méthodes :

- la méthode des isodromes
- et la méthode des vitesses spécifiques. (A.Sari, 2002)

Le moulinet



- **Mesure à l'aide de flotteurs :**

Ce procédé est à utiliser :

- S'il est impossible d'employer un moulinet (vitesses ou profondeurs excessives, présence de matériaux en suspension ou vitesses trop faibles, etc.) ;
- Si l'on veut obtenir une estimation rapide du débit.

La vitesse de l'écoulement est déterminée en mesurant la vitesse de déplacement de flotteurs largués dans le cours d'eau. On peut utiliser des flotteurs naturels ou artificiels : bouchons de pêche, bulle d'eau, morceaux de bois, tubes PVC bouchés, bouteilles, balles de ping-pong, balle de caoutchouc, orange (presque la même densité que l'eau naturelle et voyant) etc.

Les flotteurs peuvent servir à la détermination des vitesses de l'écoulement en surface, en profondeur, ou moyenne sur une verticale

$$Q = k \times V_m \times S$$

k coefficient de débit, inférieur ou égal à 1 (sans dimension) ;

V_m vitesse moyenne (en m/s) donnée par le temps moyen mis par le ou les flotteurs pour parcourir une distance ;

S : section mouillée en m².

1.1.3 Les méthodes «physiques», qui prennent en compte les variations, lors de l'écoulement, de certaines propriétés physiques du liquide (concentration en certains éléments dissous).

- **Jaugeage par dilution :**

La méthode par dilution entre dans la catégorie des méthodes physiques, puisqu'elle est basée sur la prise en considération des variations de la concentration (propriété physique) d'un traceur dans l'eau. Cependant, les traceurs employés sont souvent des corps chimiques que l'on dose par des procédés chimiques ; d'où l'appellation « méthode chimique » ou « jaugeage chimique » pour qualifier également la méthode de dilution.



La méthode n'est exposée ici que de manière résumée et simplifiée : on donne le principe général d'un des procédés de mesure par cette méthode (procédé par injection instantanée).

La méthode de dilution présente des potentialités intéressantes, et lorsque les conditions de mesure sont optimales, la précision obtenue est très satisfaisante (de l'ordre de 5 %). En outre, elle est particulièrement adaptée aux petits débits et représente, dans certaines conditions de site (notamment pour certains tronçons de torrents de montagne), le seul moyen de détermination du débit. Elle est également complémentaire de la méthode par exploration du champ des vitesses : les caractéristiques d'écoulement convenant à l'utilisation de la méthode de dilution sont justement, pour la plupart, celles qui font déconseiller l'utilisation de la méthode par exploration du champ des vitesses.

La méthode consiste à injecter un traceur en solution (de concentration connue) en un point du cours d'eau et à suivre l'évolution de sa concentration au niveau d'une section située à l'aval. La distance entre le point d'injection et la section aval choisie doit être suffisante pour que le mélange du traceur avec l'eau puisse être complètement réalisé. La longueur minimale du

tronçon de rivière nécessaire pour assurer ce mélange est appelée communément « longueur de bon mélange ».

La méthode est particulièrement adaptée aux torrents de montagne sur lesquels le brassage est important (tourbillons, lits sinueux, forte rugosité), mais elle peut également être employée sur des cours d'eau plus calmes, à condition de prendre une « longueur de mélange » plus grande.

L'injection s'effectue sous forme d'une solution concentrée, soit de façon quasi instantanée, soit de façon continue à débit constant.

Seule la méthode par injection instantanée (appelée aussi méthode globale ou méthode par intégration) est donnée ici, car :

- sa mise en œuvre reste simple (notamment, il n'y a pas besoin d'équipement particulier d'injection) ;
- elle n'exige l'injection que d'une faible quantité de traceur, d'où moins de risques pour la qualité de l'eau et un coût modique.

$$Q = k \left(\frac{C_1}{C_2} \right)$$

- k coefficient de débit inférieur ou égal à 1 (sans dimension)
- C_1 concentration du traceur au point d'injection
- C_2 concentration du traceur à l'aval du point d'injection

1.1.4 Les déversoirs :

Cette technique utilise les résultats des expériences menées dans les laboratoires hydrauliques. La méthode consiste à implanter dans l'écoulement une section de contrôle artificielle (un déversoir), permettant d'obtenir un régime critique, c'est à dire une relation univoque entre le débit Q et la charge h (hauteur d'eau au-dessus du seuil) de la forme:

avec: $Q = K \cdot C \cdot h^n$

K - coefficient de débit lié à h ;

C et n - paramètres dépendant des caractéristiques du seuil.

Ces déversoirs peuvent être triangulaires, rectangulaires ou trapézoïdaux.

Comme la formule est déterminée expérimentalement, il y a lieu de procéder à des jaugeages de contrôle pour vérifier les valeurs de C et de n .

1.1.5 Formule de Chézy -Manning :

Les traces des plus hautes eaux laissées sur les berges par les pointes des crues permettent de déterminer, par nivellement, la pente s (en %) de la surface des plus hautes, la surface S (en m^2) de la section de l'oued et le rayon hydraulique R (en m) [le rayon hydraulique est égal à la surface de la section de l'oued divisée par le périmètre mouillé]. Ces données permettent l'utilisation de la formule de Chézy-Manning :

$$Q = \frac{1}{n} A R^{3/2} s^{1/2}$$

n est le coefficient de rugosité de l'oued (on prend $n = 0,035$). (A.Sari, 2002)

2. les crues :

2.1 . Terminologie :

La notion de crue est liée à celle de temps de concentration des eaux pluviales sur un bassin. Il est relativement aisé d'imaginer la genèse d'une crue à partir de la pluie. Sur une surface réduite, la fraction de la pluie qui n'a pas été interceptée et ne s'est pas infiltrée, ruisselle sur le terrain. (Roche. M, 1963)

Essentiellement, il y a crue chaque fois qu'un cours d'eau sort de son lit naturel ou artificiel. La crue n'est donc pas une notion de pure hydrologie, mais bien de géomorphologie et de gestion, puisqu'elle fait intervenir le paramètre de la capacité du lit, régi par une interdépendance complexe entre plusieurs éléments, l'hydrologie étant l'un d'eux et les autres (souvent plus importants) la géologie, la topographie, les forces géophysiques et l'action de l'homme sur le milieu.

En analyse hydrologique, le terme « crue » a généralement servi à indiquer une onde de débit caractérisée par une certaine pointe et, finalement, cette pointe même. Cette onde ou cette pointe provoquera ou non une inondation selon qu'elle débordera ou non des berges.

2.2 . L'hydrogramme :

C'est le graphique de la variation temporelle du débit d'écoulement d'eau, mesurée au sol. On utilise des hydrogrammes pour étudier cette variation soit au point d'un bassin versant (*hydrogramme de précipitations*), soit à une section d'un cours d'eau (*hydrogramme de ruissellement*).

L'hydrogramme est une information fondamentale pour établir les projets d'assainissement, de rétention d'eau (réservoirs, bassins d'écrêtement de crue) ou d'hydroélectricité (capacité des évacuateurs de crue).

Dans la plupart des cas, l'hydrogramme est une courbe reconstituée à partir de mesures pluviométriques ou de mesures de jaugeage, en lui supposant une forme *a priori* : on ne dispose en effet pratiquement jamais de l'hydrogramme au point géographique souhaité, de sorte qu'il faut s'appuyer sur les hydrogrammes de points voisins et sur les données du relief (contributions des différents points du bassin versant) pour en obtenir une estimation.

On distingue sur un hydrogramme (Figure 13) : (G. Rémeniéras, 1960)

- la partie montante (d'augmentation du débit), dite **courbe de concentration**. La durée correspondante est appelée **temps de montée** ;
- la pointe, ou pic, de l'hydrogramme ;
- la partie à décroissance rapide, dite **courbe de décrue**. La durée totale couvrant la concentration et la décrue est appelée **temps de base** de l'hydrogramme ;
- la branche finale, à décroissance plus lente, dite **courbe de tarissement**.

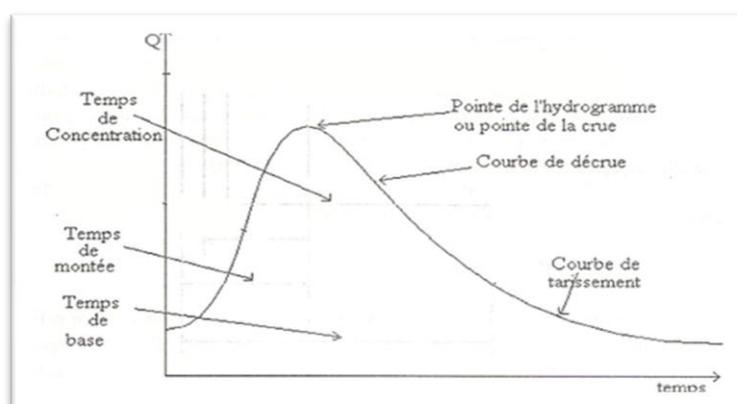


Fig. N° 13 Schéma d'un hydrogramme de crue (A.Sari, 2002)

2.3 .Caractéristiques des crues :

Du point de vue de la gestion, la crue se caractérise essentiellement par le degré auquel elle interfère avec les activités humaines, qui se mesure par l'ampleur des pertes économiques effectives ou virtuelles et/ou par son danger pour les vies humaines.

Pour un tronçon de rivière et pour une utilisation donnée des terres qui le bordent, la gravité d'une crue dépend généralement de son "amplitude". Bien qu'intuitivement il paraisse clair, ce terme a en fait un sens très vague, car il peut se rapporter à plusieurs caractéristiques physiques de l'onde de crue, qui sont les suivantes :

La hauteur de crue est la hauteur maximale atteinte par l'eau au cours de la crue. Théoriquement, c'est la caractéristique la plus importante, puisque c'est d'elle que dépend le débordement. Hydrologiquement, ce n'est pas la plus indiquée pour une évaluation de la crue, puisqu'elle varie d'un point à un autre et caractérise donc une section transversale donnée, mais non l'onde de crue se déplaçant le long du cours. De plus, la hauteur n'est pas toujours le meilleur indicateur de la gravité de la crue. Par exemple, une crue provoquée par un orage d'été peut être très haute, mais souvent de courte durée et de volume relativement réduit. En conséquence, l'inondation ne cause pas nécessairement beaucoup de dégâts, car elle met en cause une petite quantité d'eau et les terrains ne restent que peu de temps sous l'eau.

Le débit de crue est le taux maximal du débit pendant la crue. C'est une caractéristique hydrologique très commode, car elle se rapporte à l'onde de crue et non pas à une section transversale particulière. Bien qu'elle ne demeure pas constante à mesure que la crue descend le cours d'eau, ses variations restent relativement faibles dans les tronçons ne comportant pas de gros affluents et sont relativement régulières. Le débit de crue ne dépend pas non plus des variations locales du lit (érosion, sédimentation) comme la hauteur de crue : c'est donc une caractéristique plus représentative non seulement pour la crue elle-même, mais aussi pour toute section transversale donnée. Autre avantage ; le débit de pointe d'une crue coïncide étroitement avec le moment où l'eau atteint son niveau maximal, ce qui donne donc une bonne indication de la hauteur. En réalité, ce débit de pointe est atteint avant le niveau maximal mais, dans la plupart des cas, la différence entre ce niveau maximal et celui qui correspond au débit de pointe est négligeable.

Pour mesurer la gravité de la crue, le débit de crue peut servir de même que la hauteur. En fait, il ne peut s'employer que par la relation qui l'unit à la hauteur en une section transversale donnée. En général, il fournit une bonne indication dans les cas où l'essentiel des dégâts proviennent du débordement, comme c'est le cas, pour exemple, avec les levées en terre, les routes en remblai, etc.

Le volume de crue est le volume d'eau qui, dans une onde de crue, dépasse un débit limite donné Q_i . Il se caractérise par ce qu'on appelle la courbe de volume de crue, donnée par la formule

$$V_i = \int_{Q_{\max}}^{Q_i} t \, dQ$$

Elle peut aisément se déduire d'un hydrogramme de crue (voir figure 14) et constitue une caractéristique indispensable chaque fois que les dégâts dépendent de la quantité d'eau qui inonde et dans les cas d'intervention visant à réduire le débit de pointe. (V. Klemes, 1975)

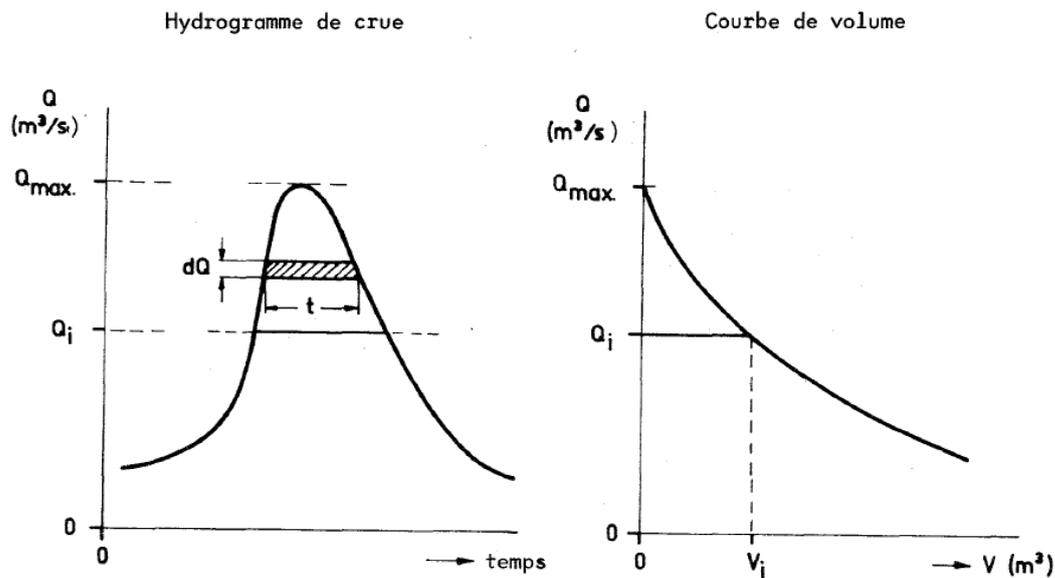


Fig.14 : calcul du volume de la crue à partir de l'hydrogramme (V. Klemes, 1975)

Du point de vue de la protection contre les inondations, le volume de la crue est de loin sa caractéristique la plus importante. Néanmoins, il n'a pas encore suscité suffisamment d'intérêt et l'essentiel des présentes analyses des crues porte sur leur débit de pointe.

La durée de la crue est la période pendant laquelle le débit ne descend pas au-dessous d'une certaine limite. Dans bien des cas, cette caractéristique se rapporte étroitement au danger que présente la crue. Une longue période de hautes eaux peut avoir un effet néfaste sur la stabilité des levées et peut provoquer sur de vastes étendues une élévation sensible de la nappe souterraine, avec des conséquences fâcheuses pour l'agriculture, la sylviculture et les quartiers habités.

La fréquence saisonnière des crues exerce une influence essentielle sur l'exploitation des plaines Inondables. Une crue au printemps ou au début de l'été peut être avantageuse en certains cas, car elle fertilise par les sédiments et minéraux qu'elle transporte en suspension, mais peut entraîner un désastre économique si elle se produit avant ou pendant la récolte. De même, l'inondation de plaines boisées peut avoir des effets catastrophiques sur la faune, si elle se produit au début de l'hiver, de sorte que l'eau gèle et que la surface reste glacée pendant une longue période, ce qui prive les animaux de nourriture et d'abri.

La vitesse du courant pendant la crue peut causer d'importants dégâts aux ouvrages tels que ponts, canaux d'amenée, travaux de régularisation, batardeaux, etc. Un rapide courant de crue gêne aussi la navigation et le dragage et, en accroissant le taux de transport de sédiments, il peut provoquer des Modifications inopportunes dans la morphologie du lit. (V. Klemes, 1975)

2.4 . **Éventualité des crues :**

Même dans les régimes très réguliers comme les régimes tropicaux, les crues d'une rivière ne se produisent pas toujours à la même date. Lorsqu'on possède un certain nombre d'années de relevés à une station, on fait ce qu'on appelle un classement des débits maximaux annuels par éventualité : l'année, ou la saison des pluies s'il s'agit d'un régime tropical, est divisée en périodes consécutives égales, de 10 jours chacune par exemple, constituant autant de classes. Le classement par éventualités est fait en portant dans chaque classe le nombre d'années pour lequel le maximum s'est produit pendant la période correspondante.

Il peut être intéressant de déterminer la répartition moyenne dans une région géographique relativement homogène. On peut prévoir que cette distribution sera moins pointue que la précédente, d'abord pour une raison statistique (par suite de l'opération de moyenne) mais aussi pour une raison physique le décalage des dates d'arrivée des crues suivant la dimension du bassin. (Roche. M, 1963)



VI. Les barrages

Définition : Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau et destiné à réguler le débit de ce cours d'eau et/ou à en stocker l'eau pour différents usages tels que : contrôle des crues, irrigation, industrie, hydroélectricité, pisciculture, réserve d'eau potable, etc. (Anton. J. et al, 2011).

1. Techniques de construction :

Généralités :

Un barrage est soumis à plusieurs forces. Les plus significatives sont :

- la pression hydrostatique exercée par l'eau sur son parement exposé à la retenue d'eau ;
- les sous-pressions (poussée d'Archimède), exercées par l'eau percolant dans le corps du barrage ou la fondation ;
- les éventuelles forces causées par l'accélération sismique.

Pour résister à ces forces, deux stratégies sont utilisées :

- construire un ouvrage suffisamment massif pour résister par son simple poids, qu'il soit rigide (barrage-poids en béton) ou souple (barrage en remblai) ;
- construire un barrage capable de reporter ces efforts vers des rives ou une fondation rocheuse résistante (barrage-voûte, barrage à voûtes multiples...).

2. Éléments de calcul :

Un barrage est soumis à une force horizontale liée à la pression exercée par l'eau sur sa surface immergée. La pression hydrostatique P en chaque point est fonction de la hauteur d'eau au-dessus de ce point.

$$p = \rho gh$$

où P est la masse volumique de l'eau, $1\,000\text{ kg/m}^3$; g est la pesanteur, environ $9,81\text{ m/s}^2$; h est la hauteur d'eau au-dessus du point considéré.

La force F résultante est l'intégrale des pressions hydrostatiques s'exerçant sur la surface immergée du barrage.

$$F = \int_S p dS$$

Cette formule ne s'intègre pas « à la main » pour les barrages à géométrie compliquée. En revanche, une expression analytique peut être obtenue pour un élément de barrage poids (un « plot », de largeur L , et de hauteur immergée constante H) :

$$F = \rho g L \int_0^H h dh$$

d'où :

$$F = \rho g L \frac{H^2}{2}$$

On voit dans cette formule que la poussée exercée par l'eau sur un barrage augmente avec le carré de la hauteur de la retenue (ce qui est vrai pour tout type de barrage). Elle ne dépend, bien sûr, pas du volume d'eau stocké dans la retenue. Le point d'application de cette force se situe au barycentre du diagramme des pressions, soit généralement au tiers de la hauteur de retenue.

Les calculs ci-dessus ne concernent que les barrages en matériaux rigides (béton, maçonnerie...), quel que soit leur type (poids, voûte, contreforts...). En revanche l'intégration *par plots* n'intéresse que les barrages de type *poids* ou *contreforts*, qui sont régis par la statique du solide. Pour les voûtes, les efforts étant reportés latéralement par des mécanismes de flexion et de compression, un calcul par plots, ne prenant en compte que les forces verticales, n'est pas suffisant et il est nécessaire de recourir à la résistance des matériaux (Déformation élastique) et souvent à des méthodes numériques avancées (méthode des éléments finis linéaires voire non-linéaires).

En revanche, en ce qui concerne les barrages en matériaux meubles (sol, terre, enrochements, remblais...), les calculs sont apparentés à des calculs de stabilité de pente des talus qui doivent prendre en compte l'état saturé ou non de ces remblais. (

3. Type des barrages :

On distingue deux types de barrages selon les matériaux qui les composent. Les barrages en matériaux rigide ou en béton ou en maçonnerie et les barrage souples(semi-rigides) ou en terre (remblai) :

3.1 Barrage en béton :

3.1.1 Barrage poids :

Caractéristiques générales :

Le barrage poids est l'un des types les plus anciens et il en existe un grand nombre dans les pays industrialisés. Construits en maçonnerie jusqu'au XIXe siècle (figure 15 et 15a), puis en béton au début du XXe, ils ont connu une certaine désaffection en raison de leur volume et de leur coût relatif, jusqu'au développement récent de la technique du béton compacté au rouleau (BCR) qui leur a donné une nouvelle jeunesse depuis 1980. Par ailleurs, ils présentent, quel que soit leur mode de construction, une solution attrayante lorsqu'il faut intégrer au barrage des structures relativement importantes, comme une usine hydroélectrique, un gros évacuateur de crues, une écluse, etc. À noter que la quasi-totalité des barrages de basse chute qui équipent les grands fleuves dans le monde sont des barrages de type poids.

Stabilité et dimensionnement :

Les barrages poids modernes ont une forme dont la section droite est proche d'un triangle dont la somme des fruits est comprise entre 0,7 et 0,8 lorsqu'ils se trouvent dans les conditions courantes, notamment pour ce qui concerne la qualité de fondation et la sismicité ; le parement amont est vertical ou à très forte pente.

Par principe, ils résistent par leur seul poids aux actions multiples de l'eau, ces forces se combinant pour donner une résultante compatible (en grandeur et en direction) avec les caractéristiques de résistance des matériaux du barrage lui-même et de sa fondation :

On se prémunit ainsi contre une défaillance par basculement ou par glissement sur la base.

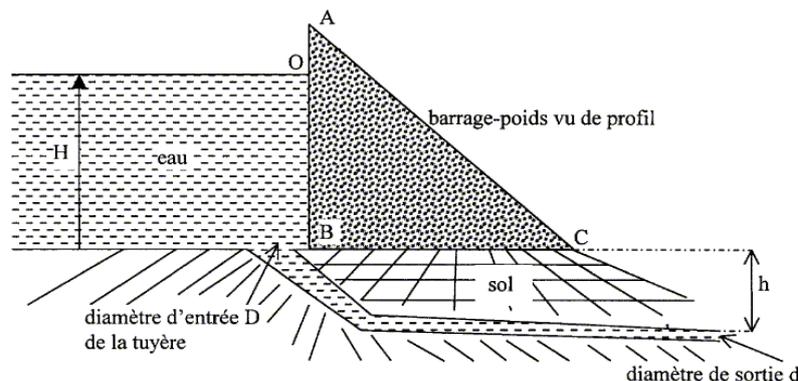


Fig. 15. Barrage poids vu de profil

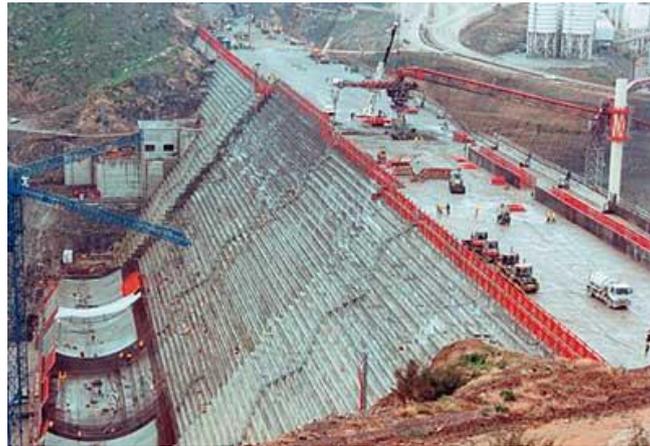


Fig. 15a. Barrage poids en construction (Beni haroun, Algérie)

3.1.2 Barrages voûtes :

Caractéristiques générales :

Un barrage voûte est une structure dont la forme est dessinée de façon à transmettre les efforts de poussée de la retenue vers les rives. Dans un schéma simplifié, c'est une superposition d'arcs horizontaux chargés chacun à leur extrados par la pression p correspondant à leur profondeur (figures 16 et 16a).

De ce fait, c'est un barrage extrêmement sûr et la seule rupture connue a été due non à la voûte elle-même, mais à la défaillance en profondeur d'une rive, dans des conditions de structure géologique, de pétrographie et de pressions interstitielles très particulières (qui n'étaient d'ailleurs pas envisageables dans l'état des connaissances de l'époque).

Les barrages voûtes trouvent leur place idéale dans les sites relativement étroits (ratio largeur en crête/hauteur inférieur à 4), lorsque la qualité des fondations est excellente, surtout sur les rives. Aujourd'hui, ils sont souvent préférés à tous les autres types pour les sites de grande hauteur (plus de 150 m).

En allant du plus simple au plus sophistiqué, on trouvera des voûtes de formes très différentes :

- les **cylindres** : tous les arcs sont identiques et superposés, avec un rayon et une épaisseur constants et égaux (réservé aux petits ouvrages, moins de 20 m de hauteur) ;
- les **cylindres-cônes** : rayon amont uniforme, le parement amont est un cylindre, l'épaisseur des arcs croît linéairement de haut en bas ; les sections verticales sont donc toutes égales à un trapèze ;
- les **simples courbures**, ainsi nommées car leur parement amont est encore un cylindre, mais l'épaisseur des arcs n'est plus constante et croît de la clé vers les appuis ; le parement aval n'est en général pas une surface réglée ;
- enfin, les voûtes à **double courbure**, pour lesquelles les deux parements sont des surfaces à double concavité dirigés vers l'aval ; en général, l'épaisseur croît de haut en bas et du centre vers les appuis.

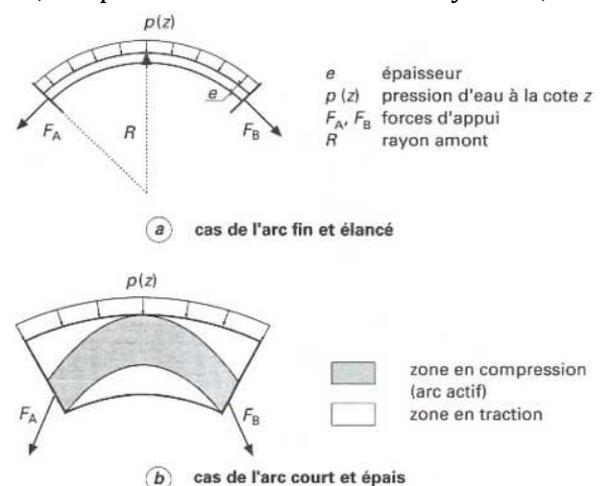


Fig. 16. Mode de travail des arcs d'une voûte

La définition de la géométrie de ces ouvrages est toujours analytique; le recours à des définitions paraboliques ou spirales améliore quelque peu l'homogénéité des champs de contraintes. La complexité croissante des formes permet un meilleur usage du béton de masse, obtenu à l'issue d'un processus d'optimisation de forme. Cela explique qu'on s'accommode de formes simples pour les petits barrages, là où la simplicité d'exécution prévaut, et qu'au contraire on réserve les définitions complexes aux grands ouvrages où les gains en volume de béton peuvent être significatifs.

Méthodes de dimensionnement :

Le premier dimensionnement, très grossier, résulte de la **formule dite du tube** et ne représente donc que le fonctionnement des arcs supposés indépendants :

$$\sigma = pRm/e..... \text{ avec}$$

σ (MPa) : contrainte moyenne dans un arc,

p (MPa) : pression d'eau à son niveau,

Rm (m) : rayon amont de cet arc,

e (m) : épaisseur.

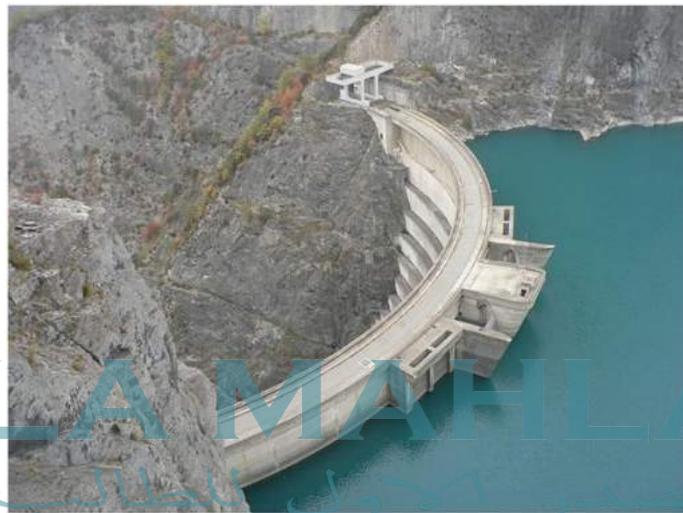


Fig. 16a. Barrage voûte

3.1.3 Barrages contreforts ou multivoûtes:

Le barrage à contreforts est constitué d'une série de contreforts supportant des bouchures. Sa construction nécessite beaucoup moins de béton que celle d'un barrage poids. Par ailleurs il peut être construit entre des rives très éloignées, contrairement au barrage voûte. Le barrage à contreforts est réalisé quand les appuis entre les rives sont trop éloignés pour construire l'arc unique d'un barrage voûte, et lorsque la fondation rocheuse est de bonne qualité, et ne requiert donc pas la construction d'un barrage poids.

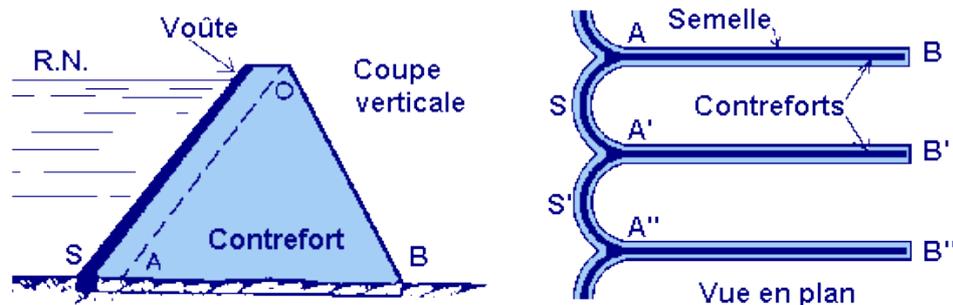


Fig. 17. Barrage contrefort (coupe verticale et vue en plan)

Les barrages à contreforts sont des barrages en béton constitués:

- Des murs, généralement de forme triangulaire, construits dans la vallée parallèlement à l'axe de la rivière. Ces murs sont les contreforts.
- Des bouchures entre les contreforts pour maintenir l'eau de la retenue. Ces bouchures s'appuient sur les contreforts auxquelles elles transmettent la poussée de l'eau.

Ces barrages offrent un avantage considérable pour la quantité de béton nécessaire: il faut 4 à 5 fois moins de béton pour un barrage à contreforts par rapport à un barrage-poids de même hauteur. Inversement, il s'agit de structures complexes, plus sensibles aux effets thermiques et aux séismes et qui nécessitent une attention particulière quant au contact avec le rocher de fondation. (Figure 17 et 17a)

Matériau: maçonnerie ou béton.

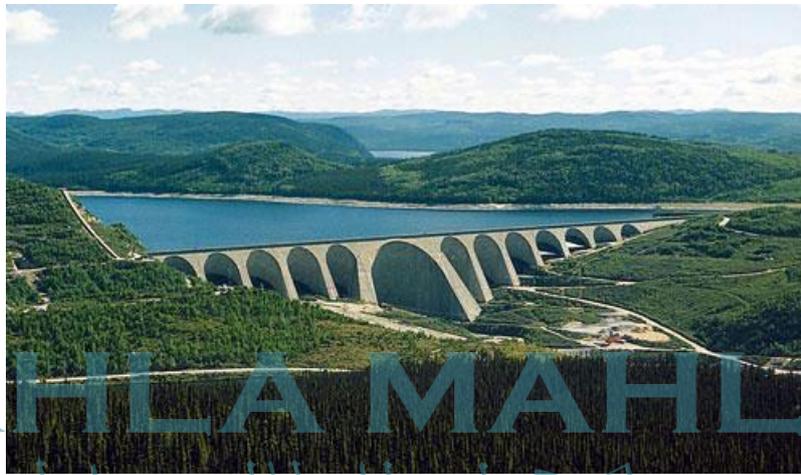


Fig. 17a. Barrage contrefort

- **Avantages:**
 - Les contraintes transmises par la fondation au rocher sont moyennes.
 - Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles.
 - Le volume du béton est faible.
 - L'échauffement du béton est faible.
- **Inconvénients:**
 - Très susceptible au séisme.
 - La résistance à l'accélération latérale est presque non existante.
 - La fouille est importante.
 - Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation est localement très élevé.
 - Les contraintes dues au gradient de température peuvent devenir importantes à la tête du contrefort.

3.2 Barrage souple (semi-rigide) :

3.2.1 Barrages en remblai :

Caractéristiques générales :

Il s'agit d'ouvrages de grand volume dont la construction a été rendue possible par l'emploi d'engins modernes de terrassement et de manutention. On choisit ce type d'ouvrage lorsque la vallée est trop large pour admettre une structure en béton et lorsqu'on trouve les matériaux sur place ou à faible distance. Ce type de barrage constitué de terre et d'enrochements comporte généralement un noyau central d'argile qui assure l'étanchéité (figure 18) .

Dans certains ouvrages, l'étanchéité est assurée par un masque amont en béton ou par un noyau béton.



Fig. 18. Barrage en terre

Cette technique a également été utilisée pour la construction de retenues de moyenne capacité.

Les deux fonctions : étanchéité, d'une part, et résistance à la poussée de l'eau, d'autre part, sont assurées par des matériaux naturels de type « sol » judicieusement organisés. Les barrages en remblai de terre ont la grande qualité de s'accommoder de fondations meubles qui seraient incapables de supporter un ouvrage en béton ; cela permet d'équiper les sites dont le fond de vallée est garni, éventuellement sur de fortes épaisseurs (100 m ou plus), d'alluvions ou de roches décomposées, déformables et plus ou moins perméables. En première approche, une bonne règle générale est que la fondation d'un barrage doit disposer de propriétés, naturelles ou obtenues par traitement, au moins équivalentes à celles du corps du barrage qu'elles doivent recevoir. Ils constituent donc une bonne solution lorsque des matériaux de qualité convenable sont disponibles à proximité immédiate. Leur défaut essentiel est une très grande vulnérabilité au déversement par-dessus leur crête, la ruine survenant très rapidement par érosion superficielle et interne de leur partie aval. Il convient donc de dimensionner très largement les organes de protection contre les crues qui leurs sont associées, et d'être très prudents lorsqu'on n'est pas sûr des données hydrologiques en matière de crues.

Toute la conception d'un barrage en terre vise à satisfaire les conditions de stabilité qui dépendent fortement de deux aspects :

- le contrôle des pressions interstitielles à l'intérieur du remblai, dont on sait qu'elles influent fortement sur la stabilité statique du remblai lui-même, dès la période de construction ;
- le contrôle des circulations d'eau à l'intérieur du remblai, où elles risquent de provoquer des érosions internes, peut-être encore plus dangereuses que les pressions, car les effets en sont souvent peu visibles jusqu'à la ruine.

Il est possible de concevoir et de construire des barrages en **terre homogène**, c'est-à-dire constitués d'un seul matériau qui assure à la fois toutes les fonctions : étanchéité et stabilité ; quelques petits barrages sont construits ainsi, et leur stabilité est correcte au prix de pentes douces de leurs parements ; toutefois, dès que la hauteur dépasse la cinquantaine de mètres, il

apparaît à la fois plus économique et surtout plus sûr de constituer un remblai hétérogène « zoné », à l'intérieur duquel les différents matériaux sont organisés de manière rationnelle en fonction de leurs propriétés de perméabilité et de résistance mécanique. On verra ainsi apparaître les notions suivantes (figure 18 a) :

- le noyau : partie assurant l'étanchéité, disposé au centre ou parfois à l'amont ;
- les recharges (amont ou aval) : parties construites avec des sols frottant, perméables de préférence, qui assurent la résistance et supportent le noyau ;
- les drains : zones (souvent peu épaisses) de forte perméabilité, aptes à collecter les fuites donc à réduire les pressions interstitielles ;
- les filtres : zones (souvent peu épaisses) dont la granulométrie intermédiaire entre celles des parties voisines s'oppose aux migrations de particules sous l'action des écoulements et lutte donc contre l'érosion interne ;
- le rip-rap : ce terme désigne une couche superficielle d'enrochements posée sur un remblai plus fin et le protégeant contre les vagues, les courants, etc.

Le barrage en enrochement est un cas particulier des barrages en remblai et appartient à la catégorie homogène. L'étanchéité sera assurée par un masque amont.

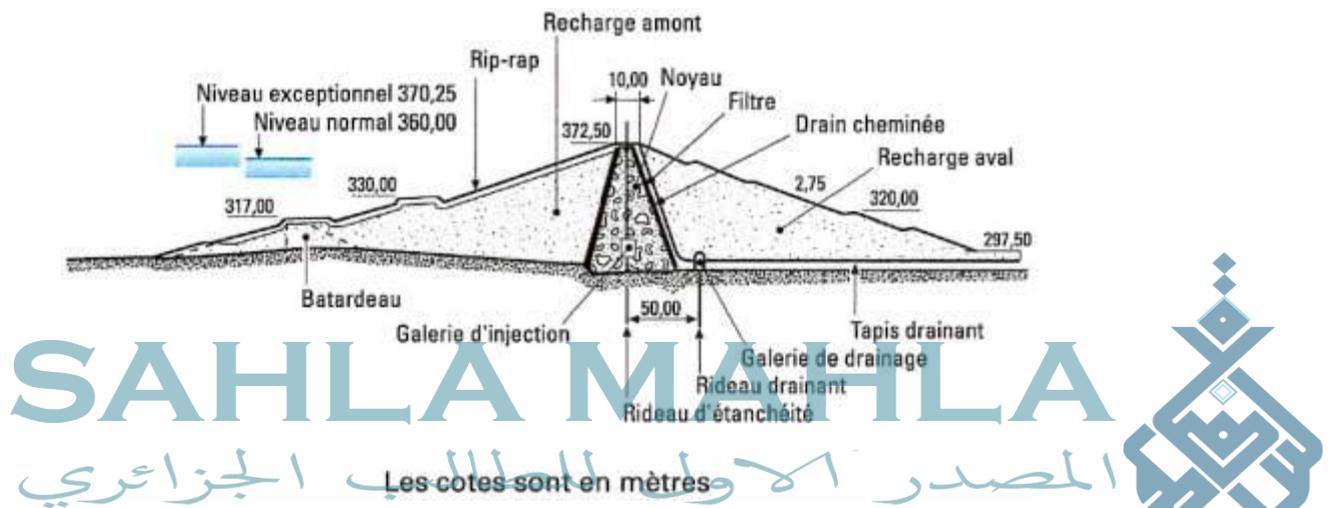


Fig. 18a. Coupe dans un barrage en terre « zoné » de Hamman Debagh (Algérie)

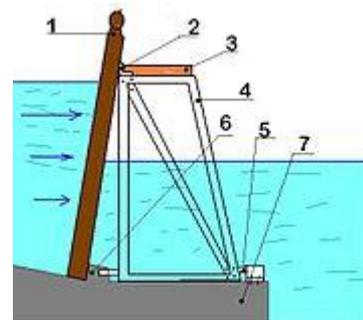
3.3 Barrage mobile :

Le barrage mobile ou à *niveau constant*, a une hauteur limitée ; il est généralement édifié en aval du cours des rivières, de préférence à l'endroit où la pente est la plus faible. On utilise généralement ce type de barrage dans l'aménagement des estuaires et des deltas.

Selon le type de construction le barrage mobile peut être :

Système Poirée : 1 = aiguille, 2 = appui, 3 = passerelle, 4 = fermette, 5 = pivot, 6 = heurtoir, 7 = radier

3.3.1 Barrage à aiguilles : Le système consiste en un rideau de madriers mis verticalement côte à côte barrant le lit du fleuve. Ces madriers ou *aiguilles* d'une section de 8 à 10 cm et longues de 2 à 4 m, selon les barrages, viennent s'appuyer contre un *butoir* (ou heurtoir) du *radier* (sur le fond) et sur une *passerelle* métallique constituée de *fermettes*. Ces *fermettes* peuvent pivoter pour s'effacer sur le fond en cas de crue et laisser le libre passage aux eaux. Les fermettes sont reliées entre elles par une *barre d'appui* qui retient les aiguilles et une *barre de réunion*, de plus elles constituent la passerelle de manœuvre. Les aiguilles à leur sommet présentent une forme qui permet une saisie aisée. Néanmoins c'est un travail fastidieux, long et dangereux (il



faut plusieurs heures et le travail de plusieurs hommes pour mener à bien la tâche). Bien que ce type de barrage soit remplacé par des techniques plus modernes et automatiques ; sur certains barrages encore existants, les aiguilles de bois sont remplacées par des aiguilles en aluminium remplies de polystyrène (pour la flottabilité en cas de chute dans la rivière), d'un poids bien moindre et plus facilement manœuvrable.

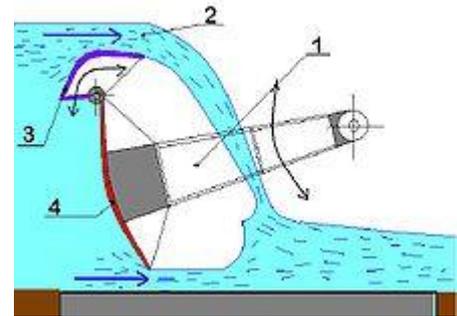
À effacement sur le fond de la rivière (seuil (barrage)) pour permettre l'écoulement total ou en position intermédiaire pour créer un déversoir.

3.3.2 Barrages mobiles à battant :

On distingue deux types :

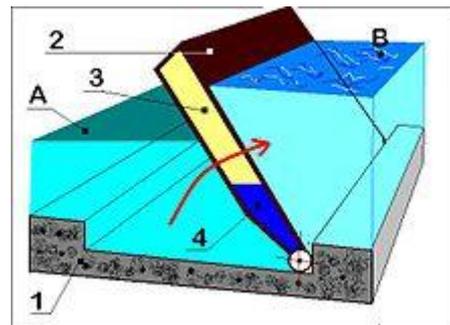
- **Barrage mobile à battant à axe horizontal** avec possibilité d'échapper en aérien lorsque le débit devient critique, ce qui évite de constituer un obstacle à l'écoulement des eaux en temps de crue. Ce type de barrage est généralement employé pour empêcher l'eau salée de remonter l'estuaire.
 - La partie fixe correspond à une plate-forme (ou radier) étanche.
 - Une grande vanne à secteur qui, en position de fermeture totale, détermine un battant qui s'appuie sur la plate-forme, alors qu'en position de soulèvement complet, il laisse l'écoulement complètement libre.
 - Une vanne à volet, montée sur la génératrice supérieure de la vanne à secteur, qui permet de régler l'écoulement dans le déversoir et le niveau d'eau désiré en amont du barrage. L'écoulement de l'eau peut se produire par le dessous du battant lorsque la vanne à secteur inférieure est soulevée (ce qui permet aussi de nettoyer la surface de la plate-forme) ; ou bien par le dessus en déversoir, lorsque la vanne supérieure à volet est abaissée.

1 = battant, 2 = déversoir,
3 = vanne à volet, 4 = vanne à secteur



Vanne par gravité : A = lagune, B = mer, 1 = socle béton,
2 = battant de vanne, 3 = air injecté, 4 = eau expulsée

- **Barrage mobile à gravité** : d'un fonctionnement théoriquement très simple, la vanne à gravité ne comporte que peu d'éléments mécaniques. Il s'agit d'un battant : sorte d'enveloppe creuse articulée autour d'une charnière fixée sur un socle de béton.
 - En position repos, l'enveloppe se remplit d'eau et descend de son propre poids sur le radier.
 - En position active, de l'air injecté chasse l'eau et permet au battant de remonter par gravité. La hauteur dépend de la quantité d'air insufflée.



3.3.3 Barrage mobile à clapets : d'un fonctionnement comparable au barrage à mobile à gravité ci-avant à la différence près qu'il est mû par deux vérins hydrauliques situés de part et d'autre du clapet. Il respecte parfaitement sa fonction : réguler l'écoulement de la rivière pour maintenir un niveau sensiblement constant dans le bief amont. Son principal inconvénient est d'être excessivement dangereux pour le touriste nautique. Les poissons ne peuvent le remonter que lorsque la rivière est en hautes eaux et le clapet complètement baissé.



3.4 Autres types de barrages :

Il existe d'autres catégories de barrages, en général de taille plus réduite.

Les barrages de stériles miniers sont des barrages construits avec des résidus d'exploitation minière pour créer une zone de stockage de ces stériles. Les barrages sont montés au fur et à mesure de l'exploitation de la mine. Ils s'apparentent aux barrages en remblai.



Les barrages de montagne sont des ouvrages destinés à lutter contre les effets de l'érosion torrentielle. Ce sont des ouvrages construits en travers des torrents. Ils peuvent interrompre (partiellement ou complètement) le transport solide; ils peuvent également fixer le profil en long d'un thalweg en diminuant l'agressivité des écoulements.



Les digues filtrantes sont des ouvrages construits en pierres libres à travers un talweg ou bas-fond dans lequel des eaux de ruissellement se concentrent lors des grandes pluies. La digue sert à freiner la vitesse de l'eau des crues, et elle épand ces eaux sur une superficie au côté amont, action par laquelle l'infiltration est augmentée et des sédiments sont déposés. La superficie inondable constitue un champ cultivable sur laquelle sont obtenus de bons rendements grâce à une meilleure disponibilité en eau et en éléments nutritifs pour les cultures comme le sorgho. En même temps, l'érosion de ravine dans le talweg est arrêtée ou évitée.



4 Fonctions d'un barrage

Sur le plan technique, un barrage doit assurer, pour un fonctionnement durable sans risque, les fonctions d'étanchéité et de stabilité.

4.1 Etanchéité :

L'étanchéité des barrages de retenues est évidemment l'objectif prépondérant.

On doit distinguer :

- l'étanchéité propre du barrage qui est liée à sa constitution, et donc peut aisément être maîtrisée et contrôlée
- l'étanchéité du bassin de retenue qui dépend de la géologie du site (nature des terrains, état de fracturation, réseaux karstiques éventuels, ...), elle est établie lors du choix du site et peut éventuellement être traitée sur des zones de faible étendue
- l'étanchéité de la liaison barrage - sol de fondation; la zone de pied de barrage est celle des plus fortes pressions, et le terrain peut être en partie remanié lors de la construction de l'ouvrage, cette zone doit donc être contrôlée et traitée soigneusement. (A. Buron et A. Meilhac, 1995)

4.2 Stabilité :

Les barrages sont soumis aux efforts liés à l'action de l'eau :

- la pression hydrostatique sur les parois en contact avec la retenue
- la pression dynamique exercée par les courants d'eau
- la pression interstitielle des eaux d'infiltration dans le sol de fondation (sous pression) qui, non seulement, réduisent les actions de contact du sol sur son support mais réduisent aussi la résistance de ces terrains.

On doit prendre en compte le poids propre du barrage et les actions de liaison du sol de fondation.

On devra vérifier :

- la stabilité d'ensemble de l'aménagement (barrage et massif de fondation) qui dépend des qualités du massif de fondation
- la stabilité propre du barrage sous l'ensemble des actions extérieures.
- la stabilité interne du barrage sous les sollicitations. (A. Buron et A. Meilhac, 1995)

5. Travaux d'injection d'étanchéité sous les digues des barrages :

5.1 Définition du procédé :

L'injection est définie comme un procédé qui consiste à faire pénétrer dans un milieu naturel (roches fissurées ou karstifiées, sols..) ou artificiel (maçonnerie, béton fissuré,..), un liquide appelé coulis susceptible de se solidifier dans le temps. Le but recherché est de réduire la perméabilité et/ou d'améliorer les caractéristiques mécaniques du milieu en chassant l'eau et l'air qui se trouvent dans ces vides et le remplacer par le coulis. (H.Cambefort, 1964)

5.2 Les milieux naturels injectables :

L'injection est effectuée afin de remplir les vides dans les sols et les roches.

On distingue en gros deux catégories principales de vides :

- les fissures dans les roches ;
- les vides dans les sols pulvérulents.

Les fissures des roches ont généralement des ouvertures sensiblement constantes. C'est pourquoi leur injection est relativement simple. Lorsque ces fissures apparaissent en surface, elles sont injectées sans qu'il soit nécessaire de réaliser des forages. Il suffit d'introduire un tuyau qui amène le coulis.

Par contre, l'injection des vides dans les sols meubles est plus complexe que celle des roches fissurées. Ceci est dû à la complexité de la structure poreuse des sols pulvérulents ; l'hétérogénéité de taille des pores qui sont successivement grands et petits.

Dans tous les cas, il est nécessaire de faire la reconnaissance du milieu à injecter afin d'optimiser le processus d'injection.

5.3 Les techniques d'injection :

Les techniques d'injection varient selon les conditions du site, les contraintes d'environnement et le champ d'application (étanchement ou renforcement, traitement provisoire ou définitif).

Diverses techniques peuvent être utilisées selon les caractéristiques du terrain à injecter : milieu fissuré ou milieu pulvérulent.

Afin de réaliser l'injection, des forages sont effectués et le coulis est injecté grâce à des pompes ou presses.

5.3.1 Injection dans les milieux fissurés :

Trois méthodes sont utilisées :

Branchement en tête de forage :

Il s'agit d'une méthode utilisée pour les traitements peu profonds comme les injections de consolidation à moins de 10 m de profondeur, de remplissage, de collage et de serrage.

- **Injection par tranches remontantes :**

Cette méthode consiste à effectuer le forage jusqu'à la profondeur voulue. Par la suite, on injecte le rocher par tranches successives en remontant à l'aide d'un obturateur simple. La longueur des tranches varie de 3 m à 10 m suivant le cas.

Il s'agit d'une méthode économique mais qui présente certains inconvénients. Elle est inapplicable lorsque le rocher est très fissuré ou si la qualité ne permet pas la bonne tenue de l'obturateur.

- **Injection par tranches descendantes :**

Il s'agit d'une méthode qui consiste à forer une tranche et à injecter à l'aide d'un obturateur. Par la suite deux procédures peuvent être suivies :

- laver la tranche injectée et forer la tranche suivante ;
- reforer la tranche déjà injectée, après prise du coulis, forer la tranche suivante et l'injecter.

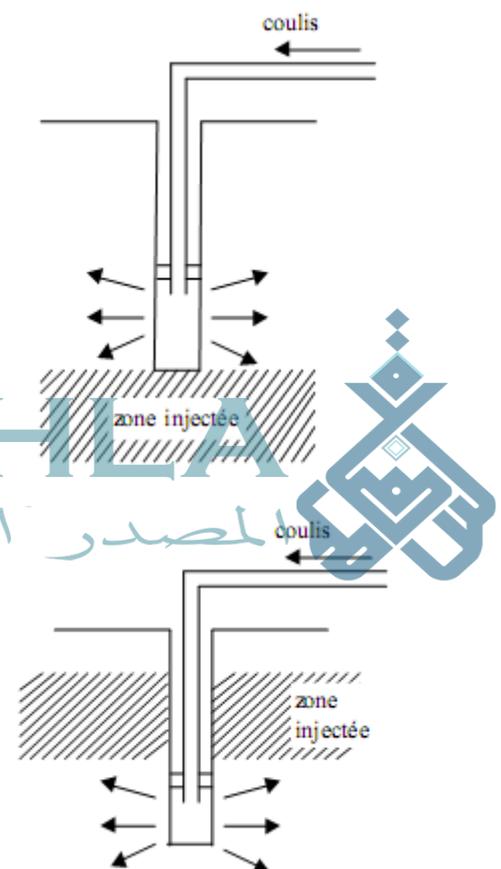
Cette méthode présente l'avantage de créer un toit protecteur pour les tranches les plus profondes ce qui permet leur injection sous haute pression.

Par contre, elle présente certains inconvénients d'ordre technique : nécessité d'imbriquer des opérations de perforation et d'injection, reforage du coulis de la tranche précédente, etc.

5.3.2 Injection dans les milieux pulvérulents :

Les trois méthodes utilisées pour l'injection du rocher peuvent aussi être utilisées dans certains cas particuliers pour les milieux pulvérulents. Mais la méthode la plus utilisée est la méthode des tubes à clapets ou à manchettes.

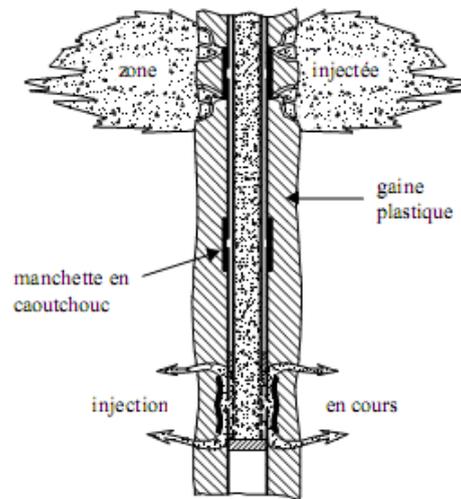
Injection par tubes à manchettes :



Il s'agit de la méthode la plus sûre pour l'injection des terrains pulvérulents. Après l'exécution du forage, un tube disposant d'orifices protégés par des manchettes (distants entre eux de 0,25 m à 0,5 m) est mis en place. Le tube est scellé au terrain par un coulis appelé « coulis de gaine ». Ce coulis de gaine a un rôle important dans l'injection. Il doit être bien choisi pour ne pas être trop plastique afin d'éviter les circulations préférentielles du coulis le long du tube et il ne doit pas être trop résistant afin de permettre son claquage au droit des manchettes.

La mise en place de ce coulis se fait au cours du forage ou à partir du fond du forage au fur et à mesure de la remontée du tubage de soutènement.

Il est à noter que l'injection ne peut se faire que grâce au claquage de la gaine au droit des manchettes. Les pressions de claquage peuvent varier de quelques dixièmes de MPa à 6 MPa. Bien que nécessitant une préparation importante (perforation du tube et mise en place des manchettes), cette méthode d'injection n'est pas plus onéreuse que les autres. De plus, c'est la seule qui garantit la qualité du travail.



L'injection est faite de la manière suivante.

Le coulis est envoyé sous pression dans le tube à manchette afin d'injecter une manchette bien déterminée (l'injection de chaque manchette peut être faite à part. Le coulis soulève la manchette (manchette cylindrique en caoutchouc) choisie afin de s'échapper vers l'extérieur. La pression d'injection du coulis permet de claquer la gaine en ciment dans laquelle est scellé le train de tube à manchette. Il faut noter que sans cette gaine, le coulis remonterait le long du tube vers la surface sans imprégner le sol. Après avoir claqué la gaine, le coulis imprègne le sol. En fait, il va remplir les pores du sol en chassant l'eau interstitielle initialement présente. (H.Cambefort, 1964)

5.4 Les types de coulis

Les coulis injectés peuvent être classés en deux catégories principales: les coulis newtoniens et les coulis binghamiens.

Les coulis binghamiens peuvent être classés, à leur tour, en coulis de suspensions stables, coulis de suspensions instables et coulis spéciaux.

Ces coulis sont caractérisés par diverses propriétés:

- le pouvoir de pénétrabilité qui est fonction de la taille des particules hydratées et de la viscosité du liquide ;
- le temps de prise ;
- Les caractéristiques mécaniques après prise (résistance, adhérence au terrain, stabilité dans le temps, etc.);
- la facilité d'utilisation (toxicité, inflammabilité, etc.).

5.4.1 Les coulis newtoniens:

Il s'agit des coulis qui ne contiennent aucune particule de dimension facilement mesurable. La viscosité de ces coulis est indépendante de la vitesse d'écoulement.

Afin d'être injectés, les coulis chimiques (newtoniens) doivent avoir certaines caractéristiques: viscosité initiale faible (viscosité lors de l'injection), augmentation très rapide de la viscosité lors de la prise, faible toxicité et bonne résistance au délavage.

On distingue trois types de coulis liquides:

- les solutions pures (résines) ;
- les solutions colloïdales (gels de silice) ;
- Les émulsions.

5.4.2 Les coulis binghamiens:

Il s'agit des coulis qui contiennent des particules de dimensions mesurables telles que les particules de ciment ou d'argile.

Les coulis binghamiens peuvent être classés en trois catégories: les coulis instables à base de ciment, les coulis stables d'argiles ou bentonite-ciment et les coulis spéciaux.

- **Les coulis instables à base de ciment:**

Il s'agit de suspensions de grains de ciment dans l'eau. Dès que l'agitation cesse, la sédimentation commence.

Ces coulis ont une bonne résistance mécanique ainsi qu'une bonne résistance dans les milieux agressifs.

| | |
|---|-----------------|
| C | masse du ciment |
| E | masse de l'eau |
| Ces coulis sont caractérisés par le rapport $\frac{C}{E} = \dots$ qui peut varier entre 0,1 et 3. | |

- **Les coulis stables ; argile ou bentonite /ciment:**

La stabilisation du coulis à base de ciment s'effectue en ajoutant de l'argile ou de la bentonite (le ciment est mélangé avec le mélange bentonite-eau ou argile-eau). Les proportions de chaque constituant du coulis (eau, argile ou bentonite, ciment) sont choisies afin de faciliter l'injection et d'améliorer les caractéristiques du terrain injecté.

- **Les coulis spéciaux:**

Il s'agit des gels de bentonite, des mortiers et des coulis expansés ou expansifs.

5.5 Les domaines d'application:

Grâce à la diversification des coulis et des matériels utilisés pour l'injection, les domaines d'application de cette méthode se sont élargis considérablement.

Ce procédé peut être utilisé dans diverses situations :

- les écrans d'étanchéité (voile d'étanchéité au pied d'un barrage, fonds injectés raccordés à des parois moulées, etc.) ;
- le renforcement des sols (amélioration de la stabilité du terrain lors de la construction d'un tunnel, amélioration de la qualité du terrain afin de faire des travaux miniers, stockages souterrains, etc.) ;
- le comblement des cavités souterraines (mines, carrières, cavités karstiques, etc.).
- la consolidation des sols situés sous des fondations (en phase de construction ou en reprise en sous œuvre) ;

les injections de scellement (tirants d'ancrage, micropieux, etc). (H.Cambefort, 1964)

5.6 Phénomènes caractéristiques de l'injection:

- **Les claquages du sol:**

Le claquage du sol est une fissuration qui apparaît dans ce dernier à cause des fortes pressions exercées par le coulis lors de l'injection. On peut assimiler ces fissures à des plans, horizontaux, verticaux ou inclinés qui coupent le forage d'injection.

Les claquages se font toujours perpendiculairement à la plus petite contrainte principale sollicitant le sol (figure 19).

Ils peuvent être très dangereux pour les constructions fondées à la surface du sol. En général, on essaye, dans la mesure du possible, de faire une injection par imprégnation (sans claquage).

Théoriquement, il est possible de faire une injection sans claquage. Il suffit d'avoir des coulis très fluides et des débits d'injection très faibles pour que la pression d'injection n'atteigne pas la pression de claquage.

Cependant, il faut noter que l'injection sans claquage est pratiquement impossible à réaliser à cause de l'hétérogénéité des terrains traités.

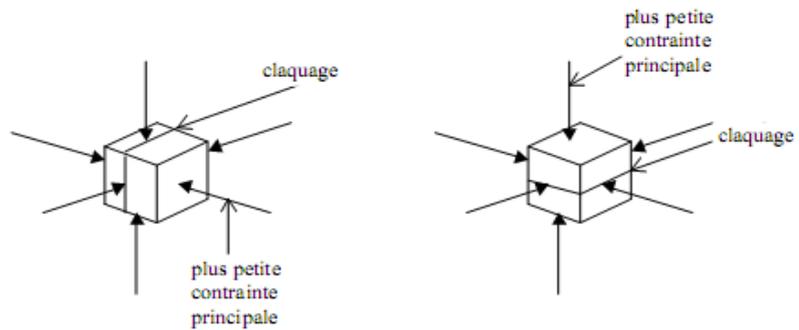


Fig. 19. Orientations des claquages

- **La filtration:**

La filtration est un phénomène que l'on observe parfois lors de l'injection, pour les coulis à suspensions. Le sol filtre le coulis lorsque certaines des particules en écoulement ne parviennent pas à passer à travers l'espace poreux du sol. La filtration entraîne un colmatage progressif des pores du sol et peut finalement bloquer l'injection.

Ce phénomène est étroitement lié aux caractéristiques granulométriques des suspensions présentes dans le coulis et celles constituant le sol à injecter.

En effet, les plus grosses particules de ciment vont colmater, petit à petit, les pores du sol et empêcher le coulis de pénétrer dans le sol.

On essaye généralement d'éviter la filtration lors de l'injection en choisissant judicieusement la granulométrie des suspensions présentes au sein du coulis (H.Cambefort, 1964).

المصدر الأول للطالب الجزائري



6 Impact des barrages sur l'environnement

Il est évident que les aménagements des rivières, qu'elles soient de petite ou de grande capacité, ont une incidence sur le régime d'écoulement puisqu'ils peuvent modifier plus ou moins temporairement l'hydrologie naturelle des cours d'eau. Les modifications ne concernent pas seulement les aspects quantitatifs mais aussi les aspects qualitatifs : les matières en suspension, les sédiments, l'évaporation, les paramètres physico-chimiques tels que la température de l'eau, l'oxygène dissous, le pH..., la vie piscicole, la flore et la faune aquatiques. Il est à observer qu'à chaque fois un nouvel équilibre s'instaure.

6.1 Impact sur les écosystèmes et la biodiversité :

Les barrages rompent le continuum du cours d'eau, provoquent d'importantes modifications physiques et chimiques qui perturbent profondément le fonctionnement écologique du fleuve et, en particulier, le comportement des peuplements de poissons, les espèces endémiques, rares et en voie de disparition, sont les premières victimes de la modification des écosystèmes. Les impacts sur la flore terrestre sont dus principalement à l'enneigement de l'habitat des plantes et au déplacement des populations, faisant disparaître ainsi les sources d'alimentation des animaux.

Les barrages affectent, ou détruisent, les écosystèmes aquatiques en amont comme en aval du barrage.

6.2 Impact sur le régime hydrologique :

Les barrages perturbent également fortement le régime hydrologique du cours d'eau : Ils transforment un système d'eau courante en un système d'eau dormante.

En aval de la retenue, ils suppriment totalement les crues et les zones humides. Ils sont à l'origine d'importantes pertes d'eau par évaporation, surtout en milieu tropical.

6.3 Impact sur la qualité de l'eau :

La création d'une retenue influe également sur divers paramètres de la qualité de l'eau dans les bassins réservoirs et en aval, et leurs effets diminuent en fonction de la distance. Les principaux changements touchent notamment la stratification thermique dans les réservoirs, et les températures de l'eau en aval, l'eutrophisation, et des changements connexes de la concentration des métaux dans les exutoires, la méthylation accrue du mercure, la rétention de sédiments, avec des changements connexes dans les teneurs en matières dissoutes, la turbidité et les éléments nutritifs dans les eaux des réservoirs et dans les eaux rejetées, une augmentation de l'érosion et du dépôt des sédiments et contaminants associés en aval.

6.4 Impact sur la sédimentation :

• **En amont :**

La réduction de la vitesse de l'eau entraîne la sédimentation des matières en suspensions sur lesquelles peut se fixer de nombreux polluants toxiques pour le milieu (métaux lourds pesticides et les éléments nutritifs).

Ces matériaux constituent la « charge interne » de la retenue. Ceci a plusieurs effets au cours du temps tel que l'envasement de la retenue, et l'accumulation des polluants. Ainsi l'accumulation importante d'éléments nutritifs provoque une grande stimulation de la vie aquatique et a pour conséquences de faire apparaître des plantes algales en très grand nombre qui donne un aspect verdâtre à l'eau et empêche toute la pratique aquatique (eutrophisation).

• **En aval :**

Les sédiments jouent un rôle d'engrais naturel. En raison de leur diminution, le recours à l'agrochimie devrait s'intensifier aggravant la pollution de l'eau du fleuve. En outre, couplée à la faiblesse du débit la réduction de l'apport sédimentaire pourrait faire reculer le delta du fleuve et entraîner la remontée les nappes salées.

7 Usage des eaux de barrage

Les barrages furent construits afin de répondre à un seul problème l'approvisionnement en eau et l'irrigation. Avec le développement des civilisations les besoins furent plus importants et plus nombreux:

7.1 Distribution d'eau pour usages domestiques et industriels:

La demande en eau augmente régulièrement à travers le monde. Il n'y a pas de vie sur Terre sans eau, l'une des ressources les plus importantes avec l'air et la terre. Depuis les trois derniers siècles, la quantité d'eau extraite des sources d'eau douce a été multipliée par 35 et la population mondiale par 8. Avec une population mondiale actuelle de 6,8 milliards grandissant en moyenne de 90 millions par an et les attentes légitimes des populations pour un meilleur niveau de vie, la demande mondiale en eau devrait augmenter d'au moins 2 à 3% dans les décennies à venir. Pour répondre à la demande grandissante, la construction des barrages supplémentaires sera nécessaire.

7.2 L'irrigation:

Aujourd'hui, les terres irriguées couvrent environ 277 millions d'hectares soit 18% des terres arables du monde pourtant elles produisent 40% des récoltes et emploient 30% de la population dispersée dans les régions rurales. Du fait de l'importante croissance démographique attendue pour les prochaines décennies, l'irrigation doit être étendue afin d'augmenter la capacité de production. On estime que 80% de la production additionnelle de nourriture en 2025 viendra de terres irriguées. Même avec la diffusion des méthodes de conservation de l'eau et les améliorations des techniques d'irrigations, la construction des barrages supplémentaires sera nécessaire.

7.3 Hydro-électricité:

L'électricité générée par les barrages est de loin la plus grande source d'énergie renouvelable au monde. Plus de 90 % de l'électricité renouvelable du monde provient des barrages. L'hydro-électricité offre aussi la possibilité unique de gérer les réseaux électriques grâce à sa capacité de produire rapidement en fonction des pics de demande

7.4 Navigation et les activités des loisirs:

Cependant la navigation fluviale a des avantages notables par rapport aux transports routiers et ferroviaires. Chaque barge peut transporter d'importantes charges, les cargaisons peuvent être de grandes dimensions et la consommation d'essence est minime comparée aux autres modes de transport. Le développement de la navigation fluviale résulte de l'aménagement nécessaire du barrage et son bassin fluvial qui sont régulés afin de réaliser des économies régionales et nationales et sur lesquels peuvent se développer différentes activités des loisirs.

7.5 Contrôle des crues :

Les barrages et réservoirs peuvent être utilisés pour réguler le niveau des rivières et réguler efficacement le débit ascendant en stockant temporairement l'eau et en la relâchant plus tard. La méthode la plus probante pour réguler le débit est la mise en œuvre d'un système intégré de gestion de Peau qui contrôle le stockage et les relâches des principaux barrages d'un bassin fluvial. Chaque barrage est réglé selon un programme spécifique fixé sur le débit habituel afin de contrôler les flux d'eau sans causer de dommage. Pour cela, il faut diminuer le niveau du réservoir pour faire plus de capacité de stockage lors des saisons pluvieuses. Cette stratégie élimine les crues.

7.6 L'Aquaculture:

L'utilisation des barrages est utile pour développer la pêche continentale très importante pour créer de nouveaux postes d'emploi et pour l'accroissement de la production nationale. (P.Le Delliou, 2003).

VII . Autres techniques de mobilisation des eaux de surface :

1. Les boulis :

Généralités

Un bouli est un réservoir (mare artificielle) creusé dans le sol, de formes et de dimensions variables, destiné à recueillir les eaux de ruissellement en saison de pluies.

Les principaux éléments du bouli sont :

*Chenal d'alimentation,*le bassin de sédimentation,*le seuil,*le réservoir,*la digue de protection
Il est utilisé pour la satisfaction des besoins domestiques :

*cultures vivrières et fourrage, pépinières et reboisement, abreuvement des animaux (abreuvoirs hors zone grillagée), autres usages domestiques.

Etudes et réalisation :

Les études préliminaires à la réalisation d'un bouli sont :

- Levé topographique de la zone d'implantation y compris la liaison avec le marigot ou le bas-fond ;
- Reconnaissance hydrologique afin d'identifier le marigot qui alimentera le bouli et d'évaluer les apports en saison de pluies ;
- Reconnaissance géologique pour identifier la nature des sols et des sous-sols (perméabilité, facilité à déblayer) ;
- Enquête socio-économiques au niveau des bénéficiaires afin d'évaluer leur intérêt pour ce type de réalisation ;

Le bouli est implanté en dehors mais à proximité du marigot ou du bas-fond ;

Le marigot est coupé à l'aval de la prise d'eau par un seuil qui permet de dériver l'écoulement vers le bouli.

Un bassin de sédimentation est construit à l'entrée du chenal d'alimentation avec, environ, la largeur au plafond de 3m, la profondeur de 1.5m et la pente de 2/1; le chenal et le bassin de sédimentation sont renforcés par des blocs en enrochement ;

Le bassin du bouli est en forme d'un tronc de cône cylindrique de dimensions variables. Il est alimenté par un canal à fond plat de longueur variable et généralement inférieure à 200m ;

Une digue localisée entre la zone de maraîchage et la zone de boisement sert à protéger le bouli contre les eaux sauvages (non décantées qui peuvent facilement le combler de sédiments). Ce sont les déblais du bassin et du chenal d'alimentation qui sont utilisés pour réaliser cette digue; Des escaliers permettent d'accéder à l'eau sans dégrader les talus ;

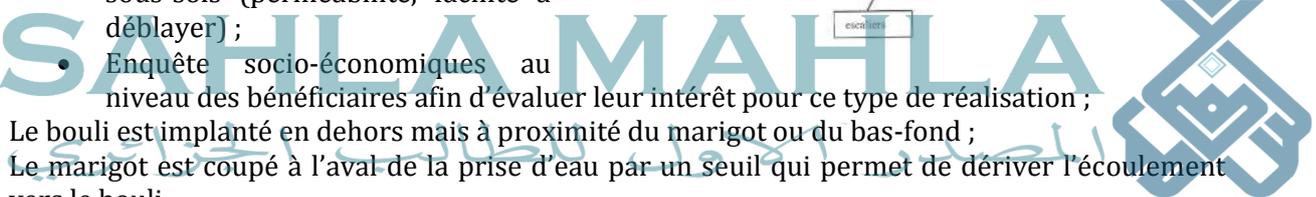
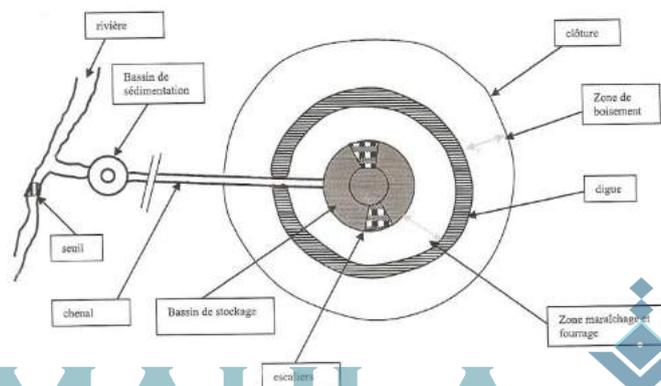
Fonctionnement et entretien :

Le bouli nécessite en début de saison la construction du seuil ou d'une diguette en matériau fusible en matériaux traditionnels sur le marigot en aval de la dérivation pour le remplissage.

Le bouli se vide en saison sèche du fait de l'utilisation de l'eau et de l'évaporation.

Les principaux travaux d'entretien du bouli sont :

- le nettoyage du bassin principal et du bassin de sédimentation ;
- la réparation des dégâts dus à l'érosion dans le chenal.



2. Les bâches à eau :

Généralités :

Les réservoirs qui sont présentés ci-dessous sont des ouvrages enterrés ou hors sol de mobilisation de l'eau en faible quantité, notamment les eaux de pluies.

Ces ouvrages peuvent jouer les rôles suivants :

- réduire les variations de la disponibilité de l'eau ;
- stocker l'eau près des utilisateurs ;
- fournir une eau de bonne qualité.

Ils se composent généralement de :

- une aire de captage : toiture, drains dans un rocher ;
- un système de transport : conduites entre le lieu de captage et le lieu de stockage ;
- un ouvrage de stockage : bâche, citerne, cuve.

L'eau mobilisée par bâches est destinée à la consommation humaine et accessoirement aux autres usages domestiques (Founémé A. MILLOGO, 2009).

Etudes et réalisation :

L'évaluation d'un site pour la réalisation d'un réservoir de captage porte sur les éléments suivants :

- l'existence d'une bonne aire de captage (toiture en tôle de préférence) ;
- les caractéristiques du sol pour la réalisation du réservoir ;
- la disponibilité des matériaux de construction.

La taille du réservoir dépend de:

- quantités d'eau à collecter ;
- attentes et besoins ;
- coûts des ouvrages.

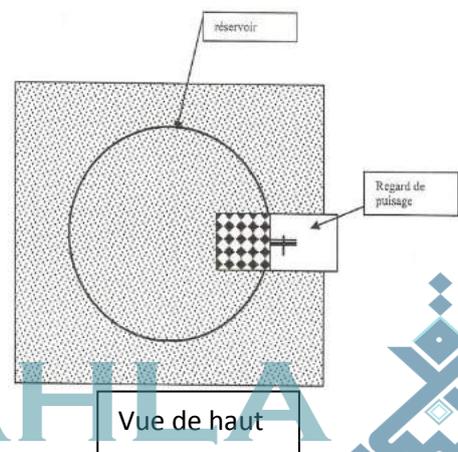
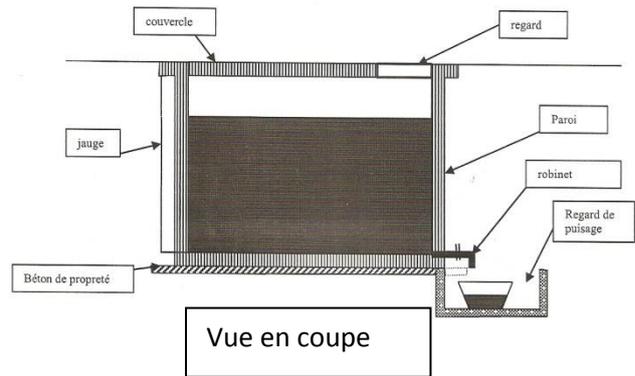
Le système de collecte comprend :

- la toiture : en tôle surface fonction des besoins
- les gouttières : pente d'au moins 0,5 % et assez large
- les citernes ou réservoirs : en PVC pour les citernes de faible capacité ou en béton

En raison de leur destination (retenir de l'eau), les réservoirs doivent être étanches : cette qualité est obtenue pour les réservoirs en béton par :

- un dosage élevé du béton (350 à 400 kg/m³)
- la réalisation d'un enduit.

Le réservoir est muni d'un couvercle et un regard pour éviter les contaminations (Founémé A. MILLOGO, 2009).



Références bibliographiques :

Documents et ouvrages :

- **André Musy**, (2005) : Cours hydrologie générale, section SIE et GC, 4eme semestre.
- **Anton. J. Schleiss, Henri Pougatsch**, 2011 : « Les barrages: Du projet à la mise en service». PPUR Presses polytechniques. 714 pages.
- **BOEGLIN Jean-claude**, (2001) : Propriétés des eaux naturelles. Référence G1110
- **Buron. A et A. Meilhac**, 1995 : cours de barrage destiné au techniciens supérieurs travaux publics.
- **Cambefort. H**, (1964) : Injection des sols « Tome I : principes et méthodes », Edition Eyrolles, Paris.
- **Dajoz R.**, (1996). Précis d'écologie. 6^e édition, Dunod, Paris, ISBN 2100031538, 9782100031535 - 551 pages.
- **Desjardins R.**, 1997. Le traitement des eaux. 2^e édition, Canada, 304 pages.
- **Faurie C., Ferra C., Médort P., Déveaux J.** (1998). Ecologie approche scientifique et pratique. 4^{ème} édition. Lavoisier, Paris, pp 282-288.
- **Founémé A. MILLOGO**, (2009) : Cours : ouvrages hydrauliques, 60 pages
- **François Renard**, (2007) : Master Professionnel « Eaux Souterraines » Cours d'hydrogéologie. Pages 4 – 6.
- **Klemes. V**, (1975) : Applications de l'hydrologie à la gestion des ressources en eau (*Au niveau de la planification et de la conception*), Organisation météorologique mondiale. ISBN 92 - 63 - 20356 - 3. Pages 71 – 74.
- **Laborde J.P.**, (2009) : Eléments d'hydrologie de surface. Document de cours correspond essentiellement aux enseignements dispensés : à Polytech'Nice (Cycle ingénieur et Master Hydroprotech), à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy (Institut National Polytechnique de Lorraine) et à l'Ecole National du Génie de l'Eau de Strasbourg. Certaines parties sont également aux programmes de multiples enseignements de formation initiale (Licences et Master. de l'Université de Nice - Sophia Antipolis) et de formation continue (C.N.F.P.T., Centre International de l'Eau de Nancy, Office International de l'Eau ...).
- **Patrick Le Delliou**, (2003) : « Les barrages: conception et maintenance ». Presses Universitaires Lyon, - 270 pages.
- **Ramade F.**, (1998) : Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau. Paris. Ediscience. 786 p.
- **Ramade F.**, (2002) : Dictionnaire encyclopédique d'écologie et de science de l'environnement. 2^{ème} édition DUNOD, 700 pages.
- **Rémeniéras. G**, (1960) : L'hydrologie de l'ingénieur, Eyrolles,.
- **Richard T. Wright, Bernard J. Nebel**, (2002): Environmental Science: Toward A Sustainable Future (8th Edition). ISBN-13: 978-0130325389.
- **Roche. M**, (1963) : Hydrologie de surface. Gauthier –villars éditeur, Paris. Pages, 288 - 292
- **Sari. A**, (2002) : Initiation à l'hydrologie de surface, Editions – Distribution Houma. ISBN. 9961 – 66 – 636 – 4. Pages 154 – 159.

Webographie :

- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage>.
- <http://echo2.epfl.ch/e-drologie.html>.