

Ouvrages Hydrauliques des systèmes d'irrigation

I. CONSIDERATIONS GENERALES SUR LES SYSTEMES D'IRRIGATION

Un système d'irrigation, également connu sous le nom de "réseau de canaux", transporte l'eau de sa source aux parcelles cultivées et à irriguer, et se compose d'une multitude de canaux (Van Den Bosch & *all*, 1993). Pour illustrer le fonctionnement d'un réseau de canaux d'irrigation, il peut être comparé à un arbre. (Figure n° 1).

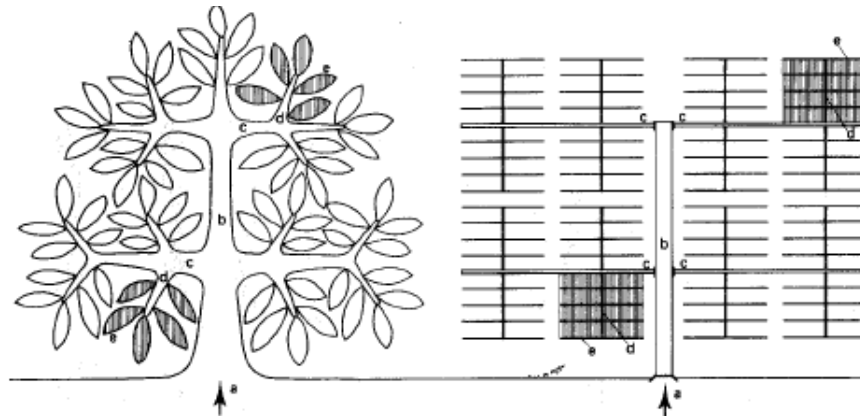


Figure n°1 : Analogie entre un arbre et un système d'irrigation.

Le tronc d'un arbre prélève l'eau du sol et la transporte aux branches et rameaux. Les branches fournissent de l'eau aux feuilles et donc finalement pour servir à la croissance du végétal et ensuite s'évaporer.

Il en est de même pour une configuration d'un système d'irrigation. En effet, la canalisation principale (le tronc de l'arbre) ramène et véhicule l'eau à partir de la source (cours d'eau, retenue réservoir, eaux souterraines,...). L'eau est alors distribuée par les canaux secondaires (les branches), aux canaux tertiaires (rameaux, brindilles) ce qui sont encore plus petits. Ceux-ci fournissent l'eau, finalement pour irriguer les champs cultivés (feuillage), avec pertes par évaporation et percolation.

I.1. - Morphologie d'un système d'irrigation

La figure n°2 montre une morphologie type d'un système d'irrigation, où une partie d'un cours d'eau est dérivée à l'aide d'une prise avec barrage. Celle-ci dessert en eau le canal principal qui à son tour transmet l'eau aux canalisations secondaires.

Les dernières sont considérées comme étant des conduites d'amenées en tête des parcelles à irriguer. Dans ce cas, la technique d'arrosage appliquée, étant l'irrigation gravitaire par siphons.

Pour alimenter les rigoles en eau, ils sont placés au niveau de la conduite d'amenée, à des intervalles réguliers, correspondant à ceux des sillons (rigoles).

Autrement dit, l'eau captée par la prise, et via le canal principal, arrive à la conduite d'amenée (canalisation secondaire), et est prélevée par les siphons disposés le long de celle-ci pour servir les rigoles et irriguer ainsi la (les) parcelle (s) cultivée (s).

Les canaux sont conçus au niveau de la zone à irriguer, de telle sorte que l'eau qui y circule soit dans le sens de la pente normale (ni faible ni forte), et assurer ainsi un écoulement par gravité.

L'eau dans ces canaux devrait être à un niveau plus élevé que dans les champs.

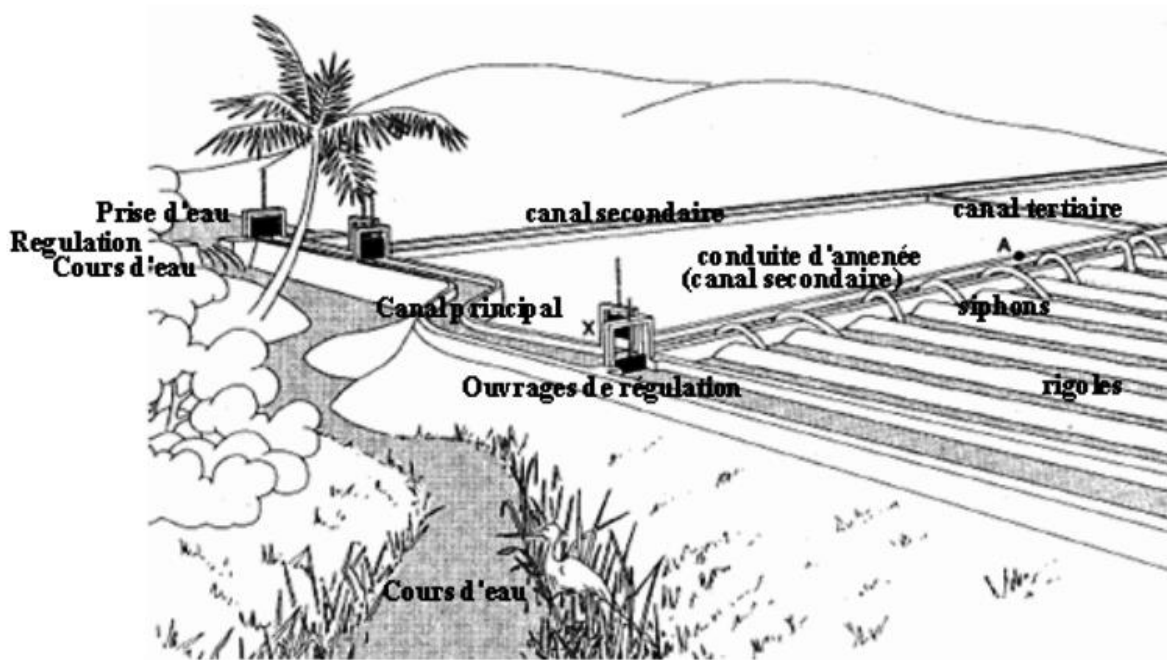


Figure n°: 2 Présentation simplifiée d'un système d'irrigation

Notons enfin, qu'un système d'irrigation est aussi doté d'ouvrages permettant de maintenir et de contrôler les débits et réguler les niveaux d'eau dans les canalisations dans les cours d'eau de prélèvement (figure n°2).

Il est important de signaler que d'autres ouvrages d'irrigation sont très pratiqués aux seins même des parcelles agricoles à l'instar de ceux situés en leur amont. A titre d'exemple, une prise d'eau est un ouvrage d'irrigation qui prélève de l'eau de la source vers la parcelle à irriguer via le système d'irrigation. C'est aussi, une brèche (ouverture), réalisée dans une première rigole pour servir en eau une deuxième pour irriguer une partie donnée d'une parcelle.

I.2 - Ouvrages d'un système d'irrigation:

Pour une gestion rationnelle d'une agriculture, l'eau est prise d'une source d'eau, est véhiculée par des conduites formant un réseau de canalisations, est ensuite délivrée en quantités prescrites vers les champs des agriculteurs.

Les volumes d'eaux fournis doivent satisfaire autant que possible les besoins en eau des cultures sans excès ni manque et garantir une récolte productive et rentable.

Un tel pari ne peut être gagné que si on maîtrise l'écoulement de l'eau dans les canalisations du système et à l'intérieur même des parcelles.

Ceci est rendu possible grâce aux techniques de régulation des niveaux d'écoulement, de control des débits et de partition des quantités d'eau dans différents conduites.

Dans ce cadre, les systèmes d'irrigation sont équipés d'ouvrages et de constructions hydrotechniques, ce qui permet d'optimiser leur fonctionnement et par conséquent éviter le gaspillage d'eau et rentabiliser les récoltes.

Ainsi ces ouvrages consistent en :

- Des prises d'eau dans les champs irrigués,
- Le niveau d'eau des rigoles et canaux des terres cultivées,
- La distribution d'eau dans le réseau de canalisation.

Pour les prises d'eau dans les champs irrigués, on peut citer de simples brèches temporaires réalisées par l'irrigant à l'aide de pioche dans les canaux de terre pour permuter l'écoulement de l'eau à travers différentes rigoles (figure n°3) ou de la rigole d'amenée vers le restant des sillons.



Figure n° 3 : Prise d'eau dans les rigoles

Bien qu'elles ne sont pas coûteuses, ces prises ont une durée de vie limitée, et ne permettent pas de contrôler les débits transités par les canalisations. Ainsi, une autre structure peut être envisagée, en bois, en maçonnerie ou en béton avec entrée et afflux d'eaux contrôlées (figure n°4).



Figure n° 04 : Structure de prise d'eau en maçonnerie

Ou encore, il peut s'agir de faussets, ce sont des tuyaux rectilignes par opposition aux siphons, de longueur et diamètre réduits, qui incérés en travers le remblai de la digue du canal d'amenée, transmettent l'eau aux rigoles placées perpendiculairement au dernier (figure n°5 et n° 6).

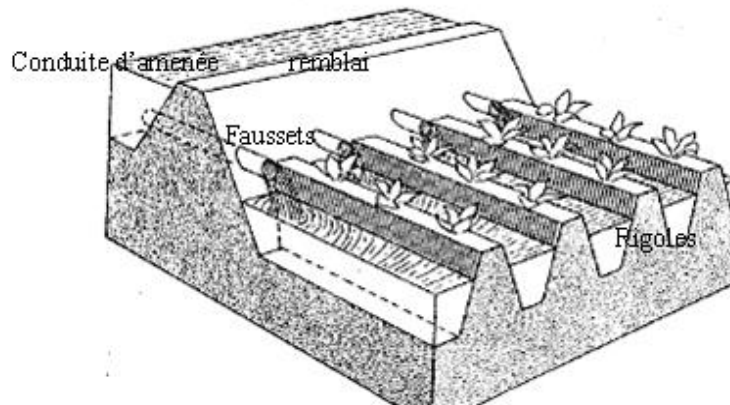


Figure n° 5 Prise d'eau en faussets



Figure n° 6 Prise d'eau avec siphons

Ces deux dernières méthodes de prises, s'avèrent coûteuses, du fait de l'obturation fréquente, ce qui nécessite des entretiens.

Le choix du type de prise d'eau à utiliser dans la parcelle agricole irriguée dépend des éléments suivants :

- Des conditions locales ; topographie du terrain (adéquation entre le plan du système d'irrigation et de celui de la parcelle à desservir), planification de l'irrigation (durée du débit délivré, type de livraison : à la demande ou par rotation,...).
- Niveau de l'eau dans les canalisations.
- Méthode d'irrigation employée (par sillons, bassins, bordures,...).
-

Le niveau d'eau des rigoles et canaux des terres cultivées, conditionne le nombre et le type de prise à utiliser dans les parcelles ainsi que leur dimensionnement.

Ainsi, l'ouverture de la prise d'eau peut être adaptée pour assuré le passage du débit d'eau demandé. Il est en est de même pour le nombre et le diamètre des siphons ou de faussets.

La différence du niveau d'eau entre le canal et le champ affecte aussi les quantités d'eau écoulées au niveau de la prise. Elle peut être réduite et adaptée pour le besoin de la prise d'eau.

Les figures n° 7 et n° 8 montrent les niveaux d'eau dans le canal d'amenée (à gauche) et dans les sillons de la parcelle (à droite) et ce, de part et d'autre d'une prise en béton équipée de système d'ouverture et de fermeture.

En position d'ouverture de la prise (figure n°7), l'eau s'écoule du canal d'amenée vers la rigole de la parcelle. Il ya donc baisse du niveau (a) et formation d'une lame d'eau en (b).

Quand celle-ci a atteint une hauteur acquise, on ferme la prise d'eau et le canal d'amenée retrouve son niveau initial (élevé) (figure n°8).

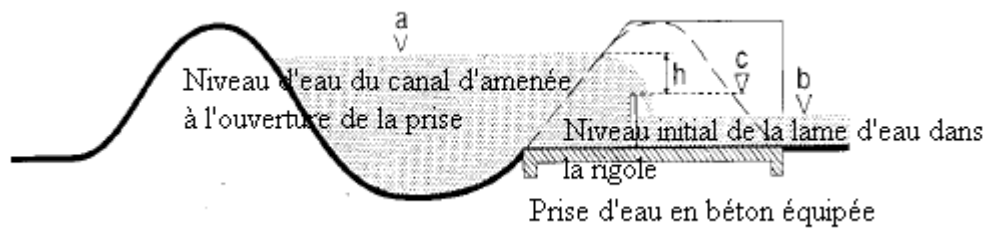


Figure n° 7 : différence de niveau en position ouverte

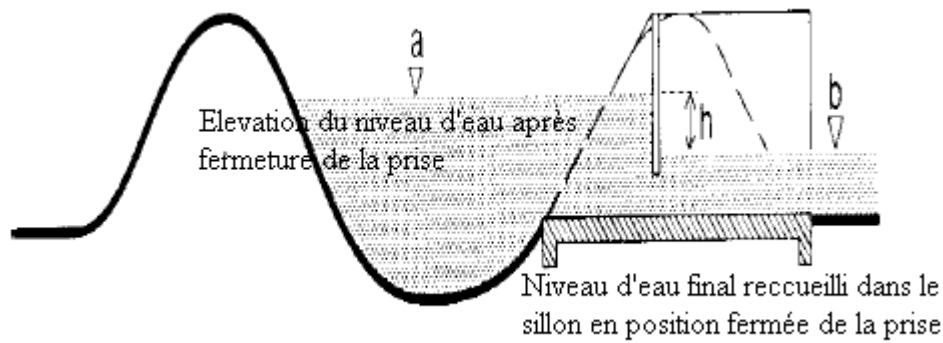


Figure n°8 : Position fermée de la prise d'eau

La différence dans des niveaux d'eau est connue comme étant la charge hydraulique et est exprimée par ' h ', où $h = a - c$ pour le dispositif ouvert, et $h = a - b$ pour le dispositif fermé. Si h augmente, le débit en travers le dispositif augmentera. En position d'ouverture (figure n°7), il a été montré que pour un accroissement de 'h' de 10%, on peut s'attendre à un débit déversé de 15%. Pour les types fermés (figure n°8).

Par contre en position d'ouverture, une augmentation de 10% de 'h' provoquerait un accroissement uniquement de 5% du débit transité par la prise. Ainsi la variation du débit est plus importante avec les dispositifs ouverts qu'avec les dispositifs fermés.

Enfin pour la distribution d'eau dans le réseau de canalisation, ces notions seront abordées plus en détails ultérieurement (chap.IV). Disons tout simplement qu'à ce niveau l'eau est distribuée proportionnellement entre canalisations principales, secondaires et tertiaires compte tenu du mode de distribution de l'eau (à la demande ou au tour d'eau).

I.3 - Autres considérations

Les niveaux d'eau entre canaux et rigoles peuvent souvent être contrôlés par des structures qui régulent le débit transitant par la prise d'eau. Si un débit est trop bas pour satisfaire aux besoins de l'irrigant, il peut élargir l'ouverture de la prise, ou élever le niveau de l'eau d'amont de la prise, suivant les conditions locales citées. Pour des structures de prise conçues en maçonnerie, il faut prévoir un dimensionnement plus important.

Ces dispositifs (figures n° 9, 10 et 11) contrôlent et les débits écoulés et les niveaux d'eau dans les rigoles y équipées, et ce de façon permanente ou temporaire.

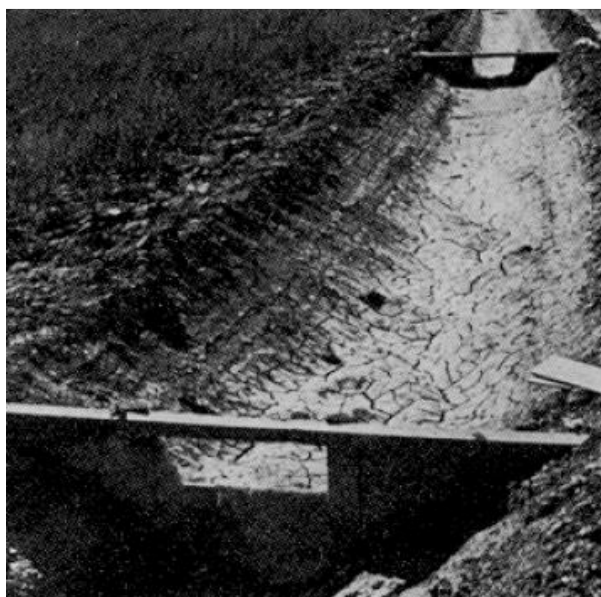
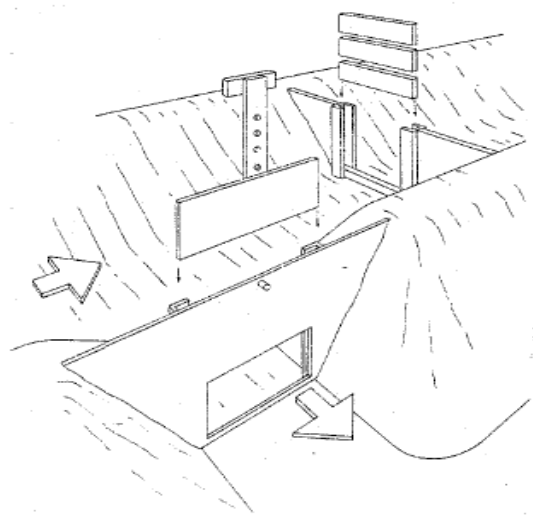


Figure n°9 : Série de structures de contrôle permanentes



Figure n°10 : Structure de contrôle portable en bois

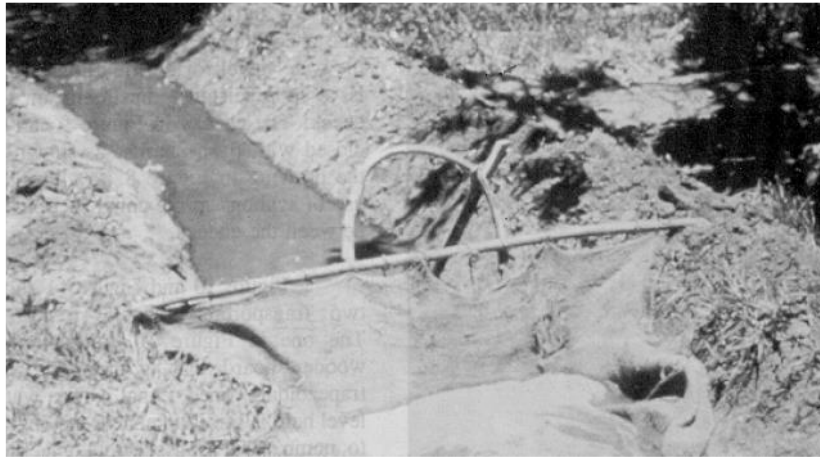


Figure n°11 : Structure de contrôle provisoire

L'avantage de toutes ces structures est le fait d'obtenir des niveaux d'eau et des débits qui croient graduellement grâce aux éléments placés les uns sur les autres au niveau de la structure (figure n° 9 à gauche). Cela permet aussi d'irriguer une parcelle agricole à tour de rôle ou souvent simultanément (figure n°12).

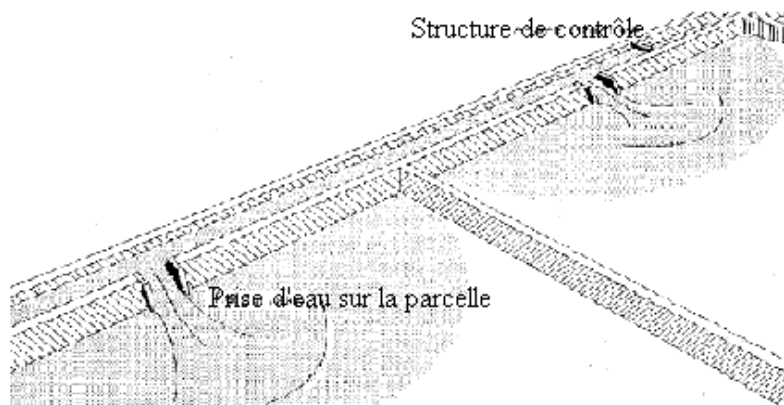


Figure n° 12 : Irrigation simultanée de deux îlots

Par ailleurs, il est très important de noter, que la notion même de systèmes d'irrigation peut changer dans la mesure, ces informations concernent les ouvrages et les systèmes d'irrigation fonctionnant avec un écoulement gravitaire de l'eau de l'eau.

En effet, il a lieu de souligner, qu'actuellement on parle plutôt de réseau collectif d'irrigation fournissant de l'eau aux irrigants sous pressions.

Dés lors qu'un aménagement hydroagricole est important, on peut classer les équipements qu'il met en jeu en trois niveaux:

- Les ouvrages de transport, acheminent l'eau d'irrigation depuis la prise d'eau jusqu'aux périmètres à desservir. Ces ouvrages transitent des débits importants (quelques mètres cubes à quelques dizaines de

mètres cubes par seconde) sur de longues distances. Ils sont constitués d'ouvrages linéaires (canaux, galeries) et d'ouvrages ponctuels (aqueducs, siphons, régulateurs, ...).

- Les réseaux de distribution répartissent à l'intérieur du périmètre et jusqu'aux prises d'irrigation propres à chaque agriculteur, l'eau amenée par les ouvrages de transport, ces réseaux ont une structure généralement ramifiée.
- L'irrigation à la parcelle est relative à la mise en œuvre de l'eau d'irrigation délivrée aux prises du réseau. On entend par parcelle d'irrigation l'unité de surface disposant d'une surface disposant d'une prise individualisée sur le réseau de distribution

Ce que nous avons présenté ici, n'est qu'une morphologie simplifiée comparé aux grands projets d'aménagement hydro agricole, où les systèmes d'irrigation font l'objet de plusieurs étapes de réalisations ; mobilisation de la source hydrique et prélèvement d'eau, transport de l'eau jusqu'à l'entrée du périmètre d'irrigation, ensuite c'est le réseau collectif qui prend le relai pour la distribution des eaux aux niveaux des prise d'eau (bornes).

Cette technologie rentre dans le cadre de la réalisation des grands projets d'aménagement hydroagricole de périmètres irrigués, notamment en Algérie, et consiste à concevoir et réaliser des systèmes d'irrigation basés sur des réseaux collectifs sous pression, modernes de façon où les quantités d'eau sont délivrées automatiquement en terme de débits prédéfinis et lis à la disposition de l'irrigant par le biais des bornes d'irrigation. C'est le cas de cas de la majorité de nos périmètres irrigués en Algérie.

II. LE CAPTAGE DES EAUX

Un captage d'eau est un dispositif de prélèvement (collecte gravitaire ou pompage) d'eau potable, d'irrigation et à usage industriel :

- soit à partir d'une source qui sort naturellement de terre (source naturelle) ou puits artésien ; soit à partir d'une nappe d'eau souterraine ou aquifère.
- soit à partir d'un cours d'eau, d'un lac naturel ou du réservoir d'un barrage.

Ces dispositifs de prélèvement consistent au simple prélèvement au niveau d'un cours d'eau en travers une d'ouverture latérale ou au niveau d'un puits, jusqu'aux grands ouvrages hydrauliques (barrages réservoirs, station de pompage, ouvrage de régulation, ouvrages souterrains, forages,.....).

II.1 Captage des eaux souterraines

Les ouvrages hydrauliques varient suivant le captage la mobilisation et l'exploitation du type d'eau souterraine. On distingue le captage d'eau par puits, forages, sources (fig. 13a), puits artésiens (fig. 13b), foggaras (fig. 13c),.....

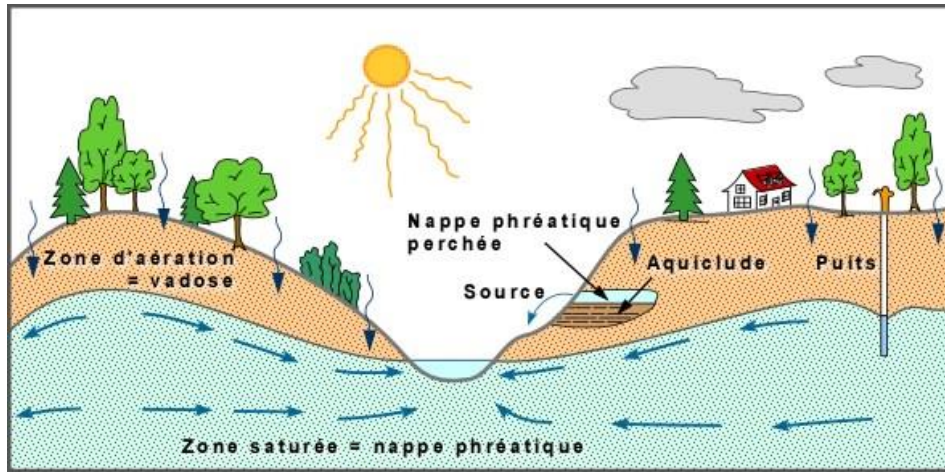


Figure 13a : Captages d'eaux souterraines par puits et sources

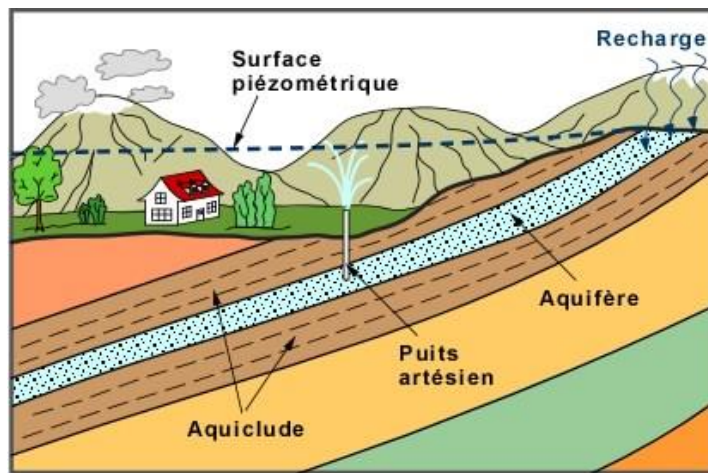


Figure 13b : Captage d'eau souterraine par puits artésien

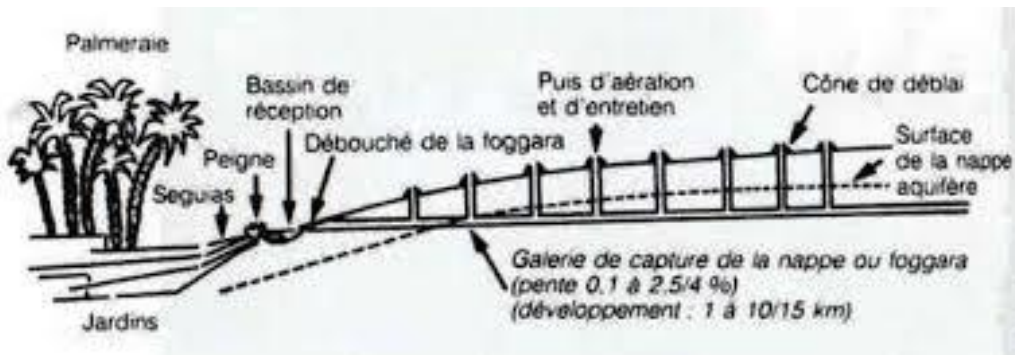


Figure 13c : Captage d'eau souterraine par foggara

II.1.1 Captage d'eau par puits et forages

Un puits à eau est un ouvrage hydraulique suite à un terrassement vertical, mécanisé (par forage, havage, etc.) ou manuel, permettant l'exploitation d'une nappe d'eau souterraine, autrement dit zone saturée, nappe phréatique et aquifère (Fig. 13a) . L'eau peut être remontée au niveau du sol grâce à un seau ou une pompe, manuelle. Les puits sont très divers, que ce soit par leur mode de creusement, leur profondeur, leur volume d'eau, ou leur équipement.

Il existe trois types de de puits ; les puits creusés ou manuels, les puits foncés et les puits forés (à pointe filtrante). Tous ces ouvrages hydrauliques captent des nappes d'eau souterraines avec des équipements qui leur correspondent (Fig. 14).

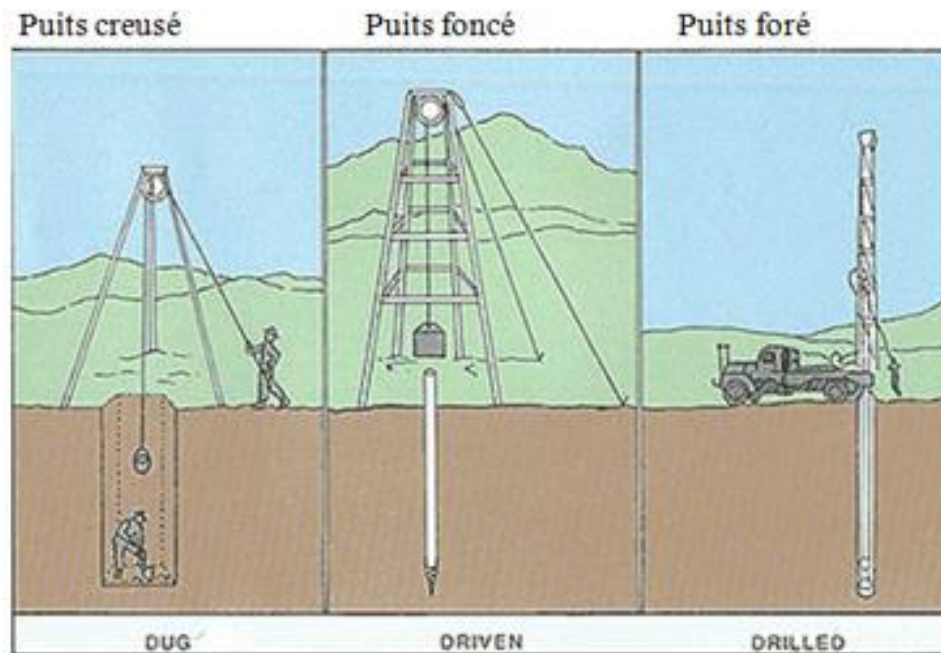


Figure 14 : Captage d'eau souterraine par différents types de puits

a) *Les puits d'eau creusés ou manuels :*

Les puits creusés manuellement figurent parmi les sources d'approvisionnement en eau les plus anciennes. Il est réalisé en creusant un trou dans le sol d'un diamètre de 60 à 120 cm avec une profondeur de 10 à 15 m généralement. Le puits est ensuite garni (tubé) de pierres, de briques, de tuiles ou d'autres matériaux destinés à le protéger de l'effondrement (fig. 15). L'eau est prélevée par sa remontée souvent manuellement à l'aide d'un récipient ou traction animale et peut être élevée aussi par pompage.



Figure 15 : Puits d'eau creusés ou manuels

b) *Les puits d'eau foncés d'eau :*

Appelés aussi puits à pointe filtrante, ils ont un tubage de petit diamètre de 2,5 à 5 cm. Ils sont construits dans des aquifères de sable et de gravier et sont enfouis ou enfoncés (insérés à l'aide d'eau sous pression élevée) dans le sol. Les puits à pointe filtrante ne sont généralement installés qu'aux endroits où l'aquifère a une nappe phréatique peu profonde et où le sol est composé de sable. L'eau est extraite par pompage. Ils n'ont normalement pas plus de 10 à 15 m de profondeur (fig. 16).

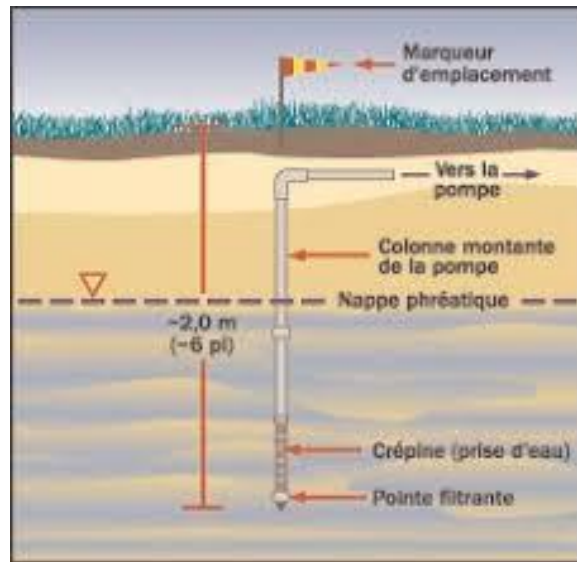


Figure 16 : Puits d'eau foncés

c) *Les puits d'eau forés :*

Un puits foré est par une foreuse autonome ou actionnée par camion (fig. 14). Il est constitué d'un trou foré dans le sol de diamètre de 10 à 20 cm, dont la partie supérieure est pourvue d'un tubage. Ce dernier empêche les parois du puits de s'écrouler. Un filtre est placé au fond du puits afin de prévenir l'afflux de sédiments dans la pompe. Le tubage fournit également un abri pour le mécanisme de pompage et pour le tuyau qui amène l'eau de la pompe à la surface sous des profondeurs allant de 30 à 60 m (fig. 17). L'eau est extraite par pompage.

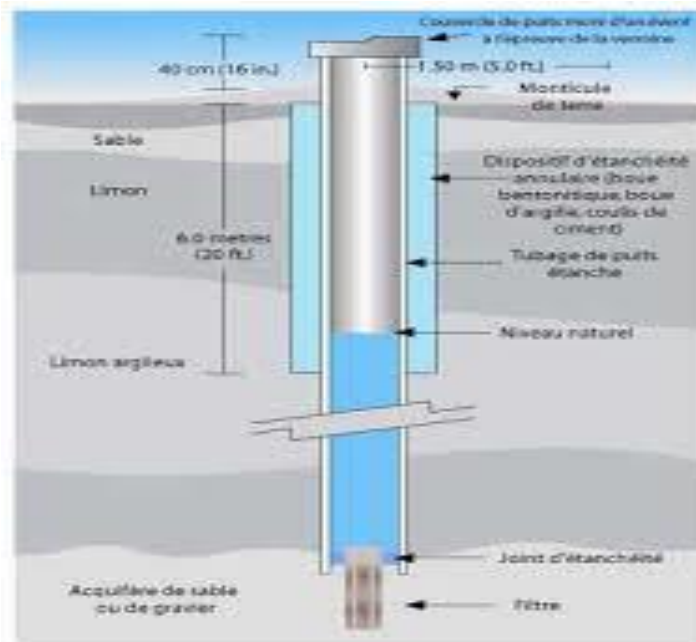


Figure 17 : Puits d'eau forés

d) *Puits artésiens :*

Puits obtenu en forant une couche de terre imperméable pour en atteindre une autre qui reçoit de l'eau de plus haut, ce qui fait qu'une pression s'exerce et force l'eau à s'écouler vers le haut. Si le niveau de l'eau s'élève au-dessus du niveau du sol, le puits est qualifié de puits artésien jaillissant. La pression artésienne peut être modérée, se traduisant alors par un mince filet d'eau au-dessus de la tête de puits, ou elle peut être très forte et donner lieu à un geyser d'eau jaillissant vers le haut. Les puits artésiens jaillissants peuvent être la source de

gaspillage d'eau étant donné qu'une grande partie de l'eau qui se déverse va probablement s'écouler et donc ne pas revenir dans l'aquifère d'origine (fig18).

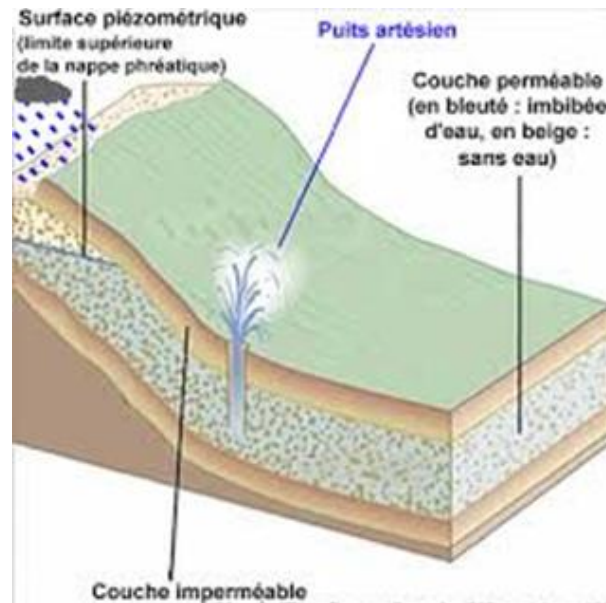


Figure 18 : Puits d'eau artésiens

e) *Foggaras*

C'est une galerie souterraine qui draine par gravité l'eau d'une nappe phréatique vers les terres cultivables en aval. Des puits d'aération plus ou moins profonds sont aménagés régulièrement pour évacuer les matériaux, aérer la galerie et assurer son entretien périodique (curage et creusement). C'est un ouvrage de système d'irrigation très ancien utilisé pour irriguer les palmeraies au Sahara notamment dans le sud Algérien (fig.13c).

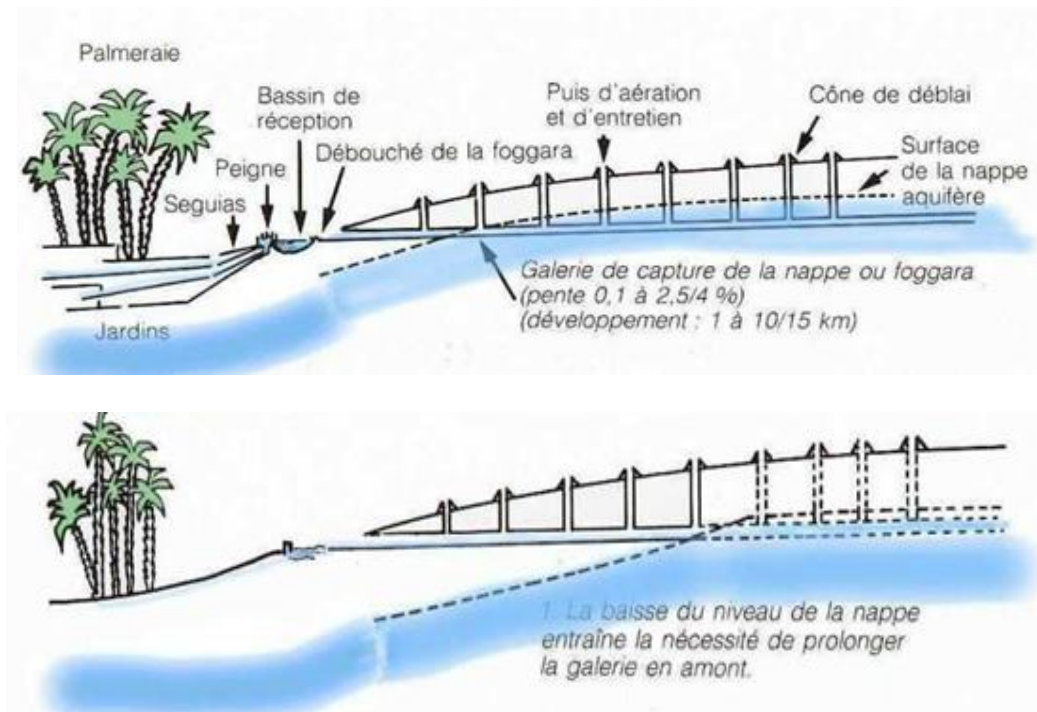
D'après la figure 19 ci-dessous, on voit le canal d'irrigation (1) qui permet l'existence de l'oasis. Ce canal est alimenté par le barrage-vanne (2). Celui-ci reçoit l'eau du bassin de réception (3) qui se trouve au débouché de la foggara (4). Les autres éléments que l'on voit sur le schéma sont les puits d'entretien (5) qui alimentent la galerie de capture (6), celle-ci traversant la nappe aquifère (7). Le schéma de fonctionnement est résumé par le circuit de l'eau qui fait communiquer la galerie de capture, le bassin de réception et le canal d'irrigation.

1: canal d'irrigation 2 : barrage-vanne 3 : bassin de réception 4 : débouché de la foggara 5 : puits d'entretien 6 : galerie de capture 7 : nappe aquifère



Figure 19 : Fonctionnement de la foggara

La durée de vie de fonctionnement de la foggara est tributaire des variations du niveau l'aquifère suite à l'irrigation des palmeraies, comme le montre l'illustration ci-dessous (fig.20).



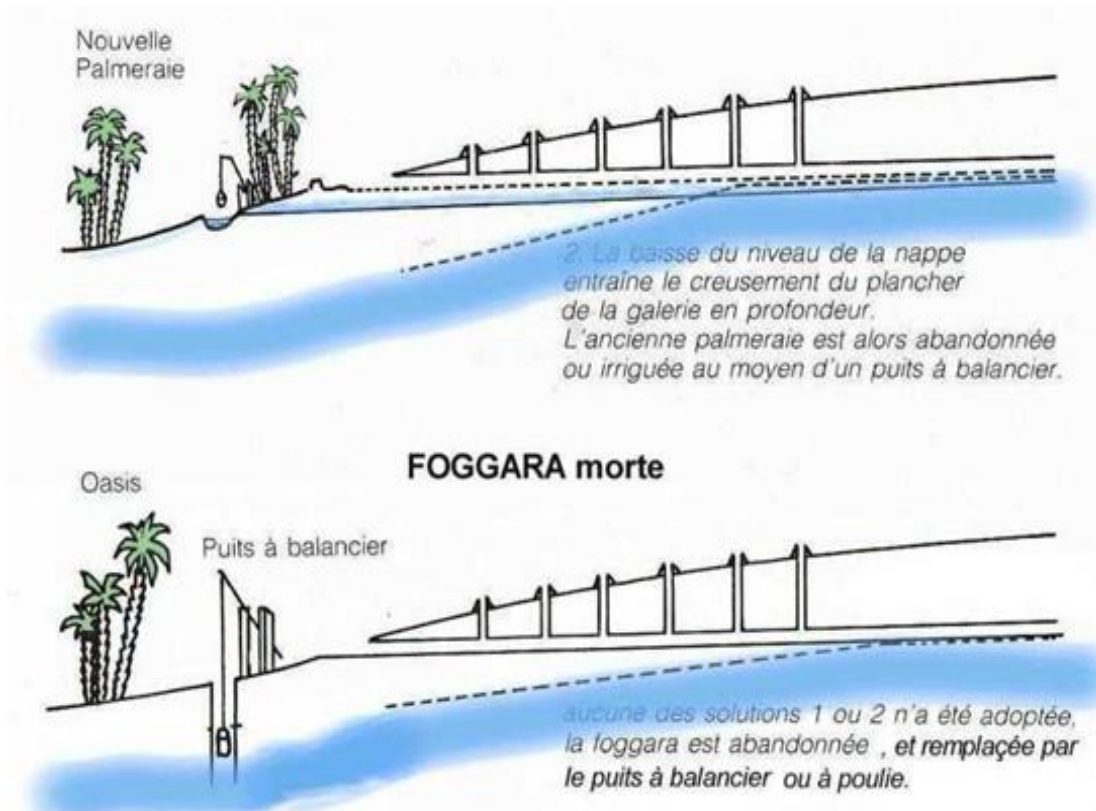


Figure 20 : Evolution de la foggara suite aux variations du niveau de l'aquifère.

II.1.2 Hydraulique des puits et forages

Les expérimentations par pompage à débit constant sur les puits et forages s'effectuent par les essais de débit (les pompes d'essai) qui consistent à mesurer l'accroissement du rabattement des niveaux piézométriques en relation avec le temps de pompage et leur remontée après arrêt de pompage.

Les interprétations sont données par résolution graphique des équations de l'hydrodynamique souterraine en régime transitoire (non permanent).

Les essais de pompage sont des tests portant sur les modifications hydrodynamiques du complexe formé de l'ouvrage d'exploitation (forage, puits) et le milieu aquifère enregistrées après provocation par pompage à un débit donné.

Dans le but d'installer un ouvrage (forage) pour l'exploitation d'une nappe, il faut répondre sur certaines questions :

Quelle est la quantité d'eau qui peut être pompée ? À quel rythme ?

Quelle pompe va-t-on choisir ? à quelle profondeur l'installer ?

Les essais de pompage ont comme objectifs :

a- la détermination des différentes caractéristiques hydrodynamiques de la nappe aquifère :

- la perméabilité K
- la transmissivité T
- l'étendue de la nappe : le rayon d'action R_a (rayon d'influence)
- le coefficient d'emmagasinement S

b- le réglage optimal d'exploitation d'un forage pour éviter la surexploitation et l'assèchement de la

nappe, à travers :

- la détermination du débit spécifique, du rabattement spécifique, la productivité de l'ouvrage, le débit maximum admissible et le rabattement maximum admissible.
- la détermination des durées et des périodes de pompage.
- la détermination de la position optimale pour l'emplacement de la pompe. Et ce par l'étude de l'évolution des rabattements en fonction des débits.

c- la détermination des différentes réserves d'eau dans la nappe (réserve exploitable, réserve renouvelable, réserve non renouvelable).

POMPAGE EN REGIME PERMANENT - FORMULE DE DUPUIT

Puits dans une nappe libre (fig. 21)

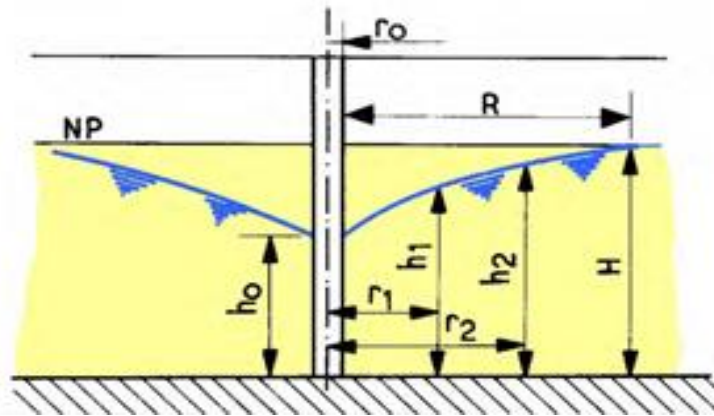
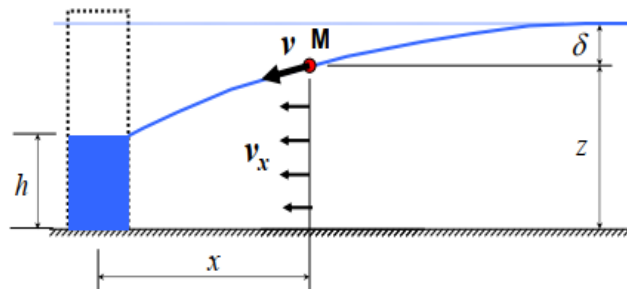


Fig.21

Soit un point M quelconque de la surface libre de coordonnées x et z.

En désignant par s l'abscisse curviligne le long de la surface libre, le gradient hydraulique en M a pour valeur $I_M = dz/ds$ et la vitesse de décharge, tangente à la surface libre, a pour module :

$$v = k \cdot I_M = k \cdot dz/ds$$



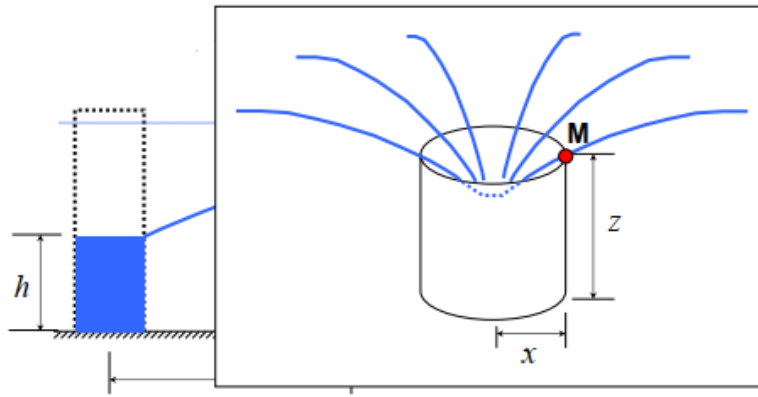
L'hypothèse de Dupuit consiste à supposer que la surface libre a une pente faible et que les lignes de courant peuvent, en première approximation, être comme horizontales et parallèles.

On peut alors écrire : $v = v_x$ et $ds = dx$ $v = k \cdot dz/dx$

En admettant que les filets liquides sont pratiquement horizontaux et parallèles, il résulte que v est la valeur moyenne de la composante horizontale de la vitesse de décharge le long de la verticale d'abscisse x.

Par suite, le débit qui entre dans le cylindre de surface S (rayon x et hauteur z) a pour valeur :

$$q = S \cdot v_x = 2 \pi \cdot x \cdot z \cdot k \cdot (dz/dx)$$



Puisque l'eau est incompressible et que le régime est permanent, q est égal au débit pompé dans le puits. En intégrant l'équation (1) entre le rayon du puits r et le rayon d'action R , on trouve la formule de Dupuit : $q = \pi k (H^2 - h^2) / \ln(R/r)$

Puits dans une nappe captive (fig. 22) :

On ne considère plus la surface de la nappe mais la surface piézométrique. Le débit à considérer entre dans le cylindre de surface S , de rayon x et de hauteur constante e (épaisseur de la nappe). L'intégration de l'équation : $q = 2 \pi \cdot x \cdot e \cdot k \cdot (dz/dx)$ conduit à : $q = 2 \pi \cdot e \cdot k \cdot (H-h) / \ln(R/r)$.

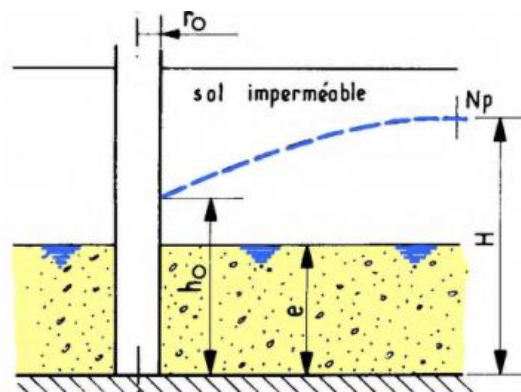


Fig.22

L'utilisation de la formule de Dupuit nécessite la connaissance du rayon d'action R . Ce dernier peut être évalué de différentes manières, soit simplement par relevé du niveau de la nappe au cours du pompage, soit à l'aide de formules empiriques, soit encore par un calcul théorique en régime transitoire.

En première approximation, on peut admettre que $100 r < R < 300 r$ ou $R = 3000(H - h) k^{1/2}$

avec : R, H et h exprimés en m, k exprimé en m/s.

Autrement, connaissant le débit pompé q et les dimensions l'aquifère R, r, H, e, o , peut aisément déterminer les paramètres hydrodynamiques telle que la perméabilité k et la transmissivité T (m^2/s) = $k \cdot e$ (ou H).

Par ailleurs, les essais de pompage permettent de déterminer d'autres paramètres hydrodynamiques comme le rabattement s suite au pompage de la nappe, le coefficient d'emmagasinement S et la transmissivité T

TYPE D'ESSAI DE POMPAGE DANS LE REGIME TRANSITOIRE

On distingue deux types d'essai :

- *L'essai de nappe (aquifère test)* : qui permet d'obtenir la transmissivité, le coefficient de perméabilité, le coefficient d'emmagasinement et le rayon d'action.

Ce type d'essais s'effectue avec le pompage de longue durée.

- **L'essai de puits (well test)** : permet de déterminer les caractéristiques de l'ouvrage et de son environnement immédiat pour déterminer si l'ouvrage répond aux besoins des usagers, de définir ces limites d'exploitations, et la possibilité d'envisager des réhabilitations pendant l'exploitation (remplacement de la pompe par exemple). Il permet également d'établir le programme d'équipement de l'ouvrage (tubage, crépine, massif filtrant).
Ce type d'essais s'effectue avec le pompage par paliers de courtes durées.

Il s'effectue en réalisant des paliers de débit constant pendant une courte durée. On mesure le rabattement à la fin de chaque palier ainsi que le débit. Chaque palier est suivi par un arrêt d'une durée permettant la remontée de niveau d'eau.
Par expériences, trois paliers avec débits croissants, dont chacun de deux heures sont suffisants.

Lors du rabattement mesuré dans l'ouvrage à un instant donné, il se crée des pertes de charges caractéristiques du complexe aquifère- ouvrage. Le rabattement devient la somme de deux composantes nommées ; pertes de charge linéaire provoquée par l'écoulement laminaire dans l'aquifère au voisinage de l'ouvrage, notée : **B.Q**

Et une perte de charge quadratique provoquée par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage, la crépine et le tubage, notée : **C. Q²**. Le rabattement total sera : **s = B.Q + C.Q²**.

Cette équation est appelée **l'équation de Jacob**, établie pour les nappes captives, alors qu'elle n'est plus valable pour les nappes libres que pour des rabattements mesurés inférieures à l'un dixième de l'épaisseur de la nappe.

Avec **s** : en m, et **Q** : en m³ /h

B et **C** : sont les coefficients de perte de charge linéaire et quadratique respectivement.

On obtient en fin de chaque palier des couples mesurés (**si, Qi**) sur la courbe (fig. 23). En reportant ces valeurs sur un graphique arithmétique, avec **s** en ordonnées et **Q** en abscisse pour obtenir finalement la courbe du rabattement en fonction des débits **s = f(Q)**.

Cette courbe est formée par deux parties :

- Une partie droite : correspondant à la perte de charge linéaire, dont la perte de charge quadratique est nulle.
- Une partie courbe : correspondant à la somme de la perte de charge linéaire et quadratique. Quand cette partie est convexe : la perte de charge quadratique est importante, et quand elle est concave, elle se traduit par un essai non valable (mesures altérées, décolmatage, amélioration de la circulation de l'eau au voisinage immédiat de l'ouvrage).

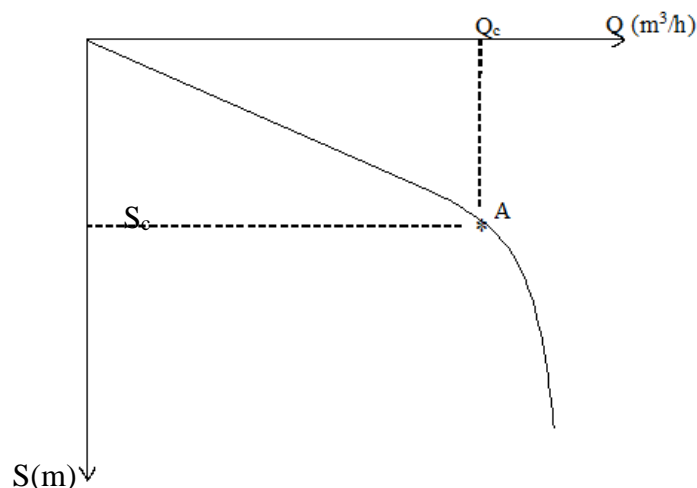


Fig. 23 La courbe caractéristique **s = f(Q)**

Les deux parties se lient par le point A correspondant au débit critique Q_c . Le débit maximal d'exploitation est fixé légèrement inférieur au débit critique.

Si aucune rupture de pente de la courbe $s = f(Q)$ n'apparaît clairement, le débit maximal est fixé en fonction du rabattement maximal admissible, soit 1 m au-dessus des crépines.

La résolution de l'équation de Jacob donne :

$$Q = [(B^2 + 4.B.s) - B]^{0.5} / (2.B)$$

En reportant les valeurs des couples $(s_i/Q_i, Q_i)$: (rabattements spécifiques, débits), en plaçant les valeurs de rabattements spécifiques en ordonnées et les valeurs de débits en abscisse ; pour tracer la courbe du rabattement spécifique en fonction du débit $s/Q = f(Q)$.

Par comparaison avec l'équation de Jacob, nous obtenons : $s/Q = CQ + B$

Cette courbe est toujours une droite. Avec C : la pente de droite B est l'ordonnée à l'origine de la courbe (la droite) Cette courbe peut prendre trois formes :

- Une droite passant par l'origine (droite n°1 sur la figure) : B est nul ; traduisant un régime turbulent et des pertes de charge turbulentes (quadratiques) résultant principalement de l'écoulement dans l'ouvrage. Dans cas :

$$s/Q = C.Q \rightarrow s = C.Q^2 \quad \text{Et les pertes de charges laminaires sont négligeables.}$$

- Une droite verticale (droite n°3 sur la figure) : C est nul ; traduisant un régime laminaire, et des pertes de charge laminaires résultant principalement de l'écoulement dans l'aquifère. Dans ce cas :

$$s/Q = B \rightarrow s = B.Q \quad \text{Et les pertes de charge turbulentes sont négligeables.}$$

- Une droite recoupant l'axe des coordonnées ; dans ce cas, la perte de charge résulte de l'écoulement dans l'ouvrage et dans l'aquifère (fig. 24).

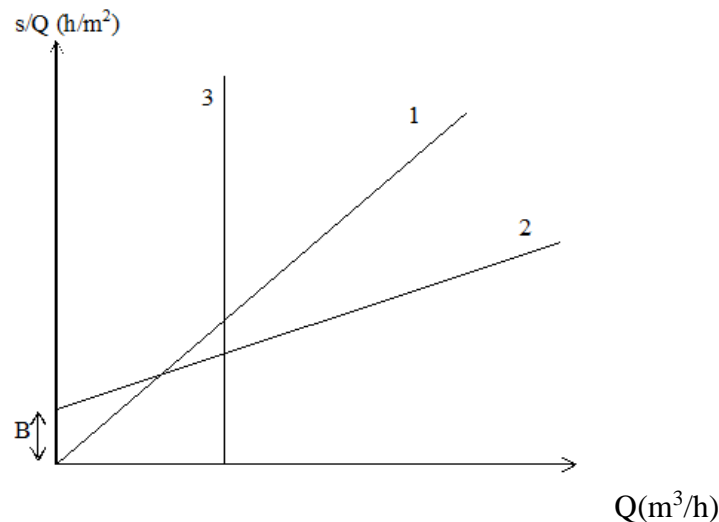


Fig. 24 La courbe $s/Q = f(Q)$

Une première évaluation des pertes de charge et de l'état de l'ouvrage est donnée par Detay (1993):

Valeur du coefficient C (m/m ⁵ /s)	Etat
$C < 5.10^{-5}$	Ouvrage bien développé
$5.10^{-5} < C < 10^{-4}$	Pertes de charge importantes
$10^{-4} < C < 4.10^{-4}$	Ouvrage colmaté
$C > 4.10^{-4}$	Ouvrage irrécupérable

La profondeur d'installation de la crépine de pompe est fonction du niveau dynamique prévisible. Ce niveau est donné par le rabattement induit par le débit d'exploitation (débit max.), majoré par des variations piézométriques annuelles (on augmente la cote de la crépine de 2 à 3m).

EXEMPLE

Soit les mesures données par le tableau suivant, effectuées pendant un essai de pompage par paliers de courte durée :

N° du palier	Débit pompé (m ³ /h)	Rabattement (m)
1	42	0,81
2	87	2,01
3	132	3,53
4	178	6,47

On demande de :

- 1- Tracer la courbe $s = f(Q)$
- 2- Déterminer la valeur de débit critique Q_c .
- 3- Déterminer le rabattement critique s_c .
- 4- Tracer la courbe $s/Q = f(Q)$.
- 5- Déduire les coefficients de perte de charge A et B et donner l'équation donnant la perte de charge.
- 6- Que peut-t-on dire concernant l'état de l'ouvrage.
- 7- Donner la valeur de débit max à pomper si le rabattement maximal admissible est 4,5 m.

L'essai de nappe (aquifère test) :

Ce type d'essais est à exécuter par un seul palier de débit (à débit constant) pendant 42 heures au moins avec un optimum de 72 heures. La remonté du niveau doit être observée pendant une durée égale.

a- Mesure avant pompage :

Avant pompage, on mesure la profondeur de l'eau dans l'ouvrage de mesure (piézomètre, forage) pour pouvoir détecter les variations naturelles de la nappe, on étalonne le système de pompage (vanne, pompe...etc.), on vérifie les appareils de mesure, et on met des repères visibles sur le sommet de tubage.

b- Pendant le pompage :

On prend des mesures de débit, de temps et de rabattement (profondeur).

Généralement, le scénario de prise de mesures se fait comme suit d'après G. Castany :

Espace de temps (min.) Depuis le commencement	Intervalles entre les mesures de rabattement
1 - 10	30 s
10 - 20	1 min
20 - 30	2 min
100 - 200	10 min
300 - 400	30 min
600	1 h

c- Après l'arrêt de pompage :

Après l'arrêt de pompage, on effectue les mêmes mesures précédemment et avec les mêmes fréquences (même scénario)

L'étude du régime d'écoulement transitoire pour les nappes captives, et les nappes libres peu profondes conduit à résoudre les équations suivantes d'Approximation de Jacob- Copper :

$$s = [0,183.Q/T]. \log_{10} [2,25.T.t/(r^2.S)]$$

Avec :

Q : débit de pompage

r : distance entre le point de mesure (piézomètre) et l'ouvrage où s'effectue le pompage, si les mesures s'effectue dans l'ouvrage lui-même ; r : sera le rayon de l'ouvrage.

T : transmissivité ; t : temps de pompage

Cette équation est appelée équation de Jacob- Copper, elle n'est applicable que pour des durées de pompage longues.

On reporte les couples de données mesurées (s, t) sur papier semi logarithmique, en reportant les rabattements s en ordonnées, et les temps t en abscisses ; et en traçant la courbe :

$s = f[\log(t)]$ (fig.25).

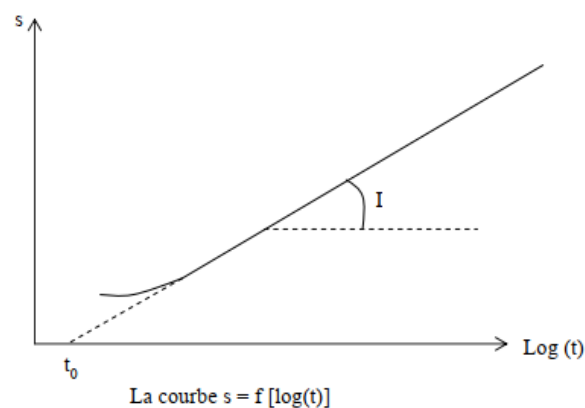


Fig. 25 : Courbe $s = f[\log(t)]$

On tire du graphe la pente de la droite I et l'abscisse du prolongement de la droite t_0 .

Par comparaison avec l'équation de Jacob- Copper :

$$I = 0,183.Q/T$$

$$\rightarrow T = 0,183.Q/I$$

$T = K.e$, dont e : l'épaisseur de la nappe

$$\rightarrow K = T/e$$

$$\text{Et } t_0 = r^2.S / (2,25.T.t)$$

$$\rightarrow S = 2,25.T.t / r^2$$

Si les mesures de rabattement sont effectuées dans le forage où s'effectue le pompage, r est alors le rayon du forage.

Les mesures de rabattement sont effectuées dans un piézomètre, r est donc la distance séparant le piézomètre de l'axe du puits.

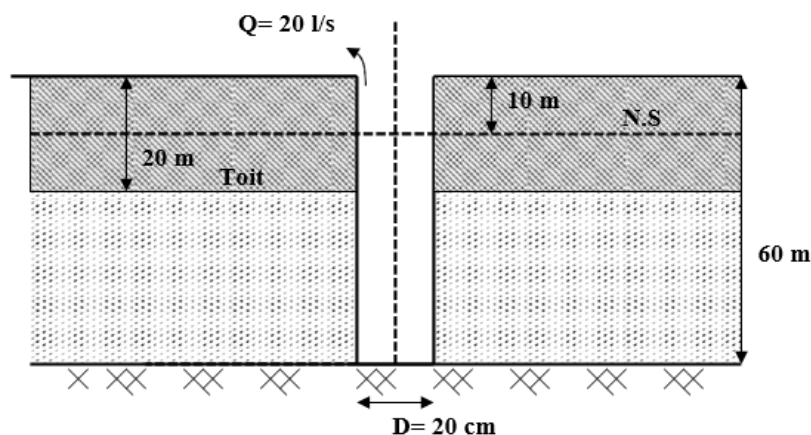
Dans le cadre d'équiper un forage de diamètre $d = 20$ cm dans une nappe captive; on a effectué un essai de pompage de longue durée avec un débit constant $Q = 20$ l/s, le niveau statique de la nappe étant à 10 m de profondeur, dont le substratum et le toit sont sub- horizontaux et se trouvent à 60 m et 20 m de profondeur respectivement.

Les mesures des profondeurs effectuées dans un piézomètre distant de 5 m de l'axe du forage, sont données par le tableau suivant en fonction du temps :

Profondeur (m)	Temps (s)	Profondeur (m)	Temps (s)
27,5	50	29,4	138
27,8	70	29,5	148
28,0	77	29,8	166
28,2	84	29,9	174
28,3	90	30,1	188
28,5	96	30,2	198
28,6	101	30,3	208
28,7	106	30,4	218
29,1	123	30,6	237

On demande de :

- 1- Tracer la courbe $s = \log(t)$.
- 2- Déterminer la transmissivité de la nappe
- 3- Déterminer le coefficient d'emmagasinement.
- 4- Déterminer le coefficient de perméabilité de l'aquifère si la nappe a une épaisseur de 40 m.



II.1.2 Captage d'eaux souterraines par barrage

Le barrage souterrain est un système consistant à retenir des eaux souterraines par un parafouille (corps du barrage) mis en place en travers des chenaux des eaux souterraines (fig. 26). Il est toutefois destiné en général à l'exploitation des eaux phréatiques, car un barrage souterrain permettant de retenir des eaux profondes demanderait une quantité énorme de travaux de construction.

L'eau retenue par un barrage souterrain est accumulée dans des formations géologiques. Autrement dit, c'est un système de réalimentation artificielle des aquifères.

Pour retenir des eaux souterraines, il est naturellement construit dans le sous-sol. Mais dans le cas d'un barrage destiné à retenir des eaux très peu profondes, par exemple des eaux contenues dans les alluvions d'un cours d'eau actuel (écoulement souterrain), une partie de son corps se trouve parfois en surface.

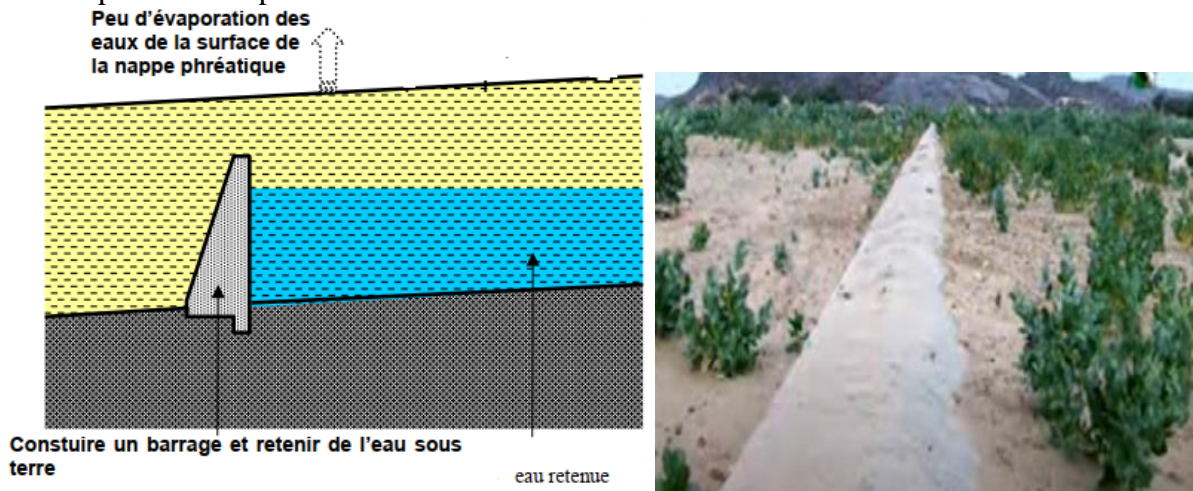


Fig. 26 Barrage sous terrain

La retenue créée par un barrage construit dans le sous-sol est naturellement à un niveau inférieur à la surface du sol. Pour l'utiliser en surface, on a donc besoin des installations de pompage. A droite de la figure présente un barrage souterrain ou appelé inféroflux à Adrar.

II.1.3 Captage des sources d'eau

Une source est un lieu d'apparition et d'écoulement d'eau souterraine à la surface du sol, elle est toujours liée à l'existence d'une nappe et peut être située au mur ou au toit du réservoir aquifère. Les sources présentent généralement les qualités de l'eau souterraine, tout en permettant une exploitation aisée. Leur présence est étroitement liée à la géologie du terrain.

Il existe plusieurs de sources d'eau, mais seules les sources d'affleurement et d'émergence ont un intérêt pour l'irrigation et l'agriculture de montagne.

- a) Les sources d'affleurement (déversement) sont celles qui apparaissent à l'endroit où affleure le substratum imperméable. Les sources d'affleurement sont alimentées par la partie inférieure de la nappe. Le fond de la vallée atteint l'imperméable (fig.27).

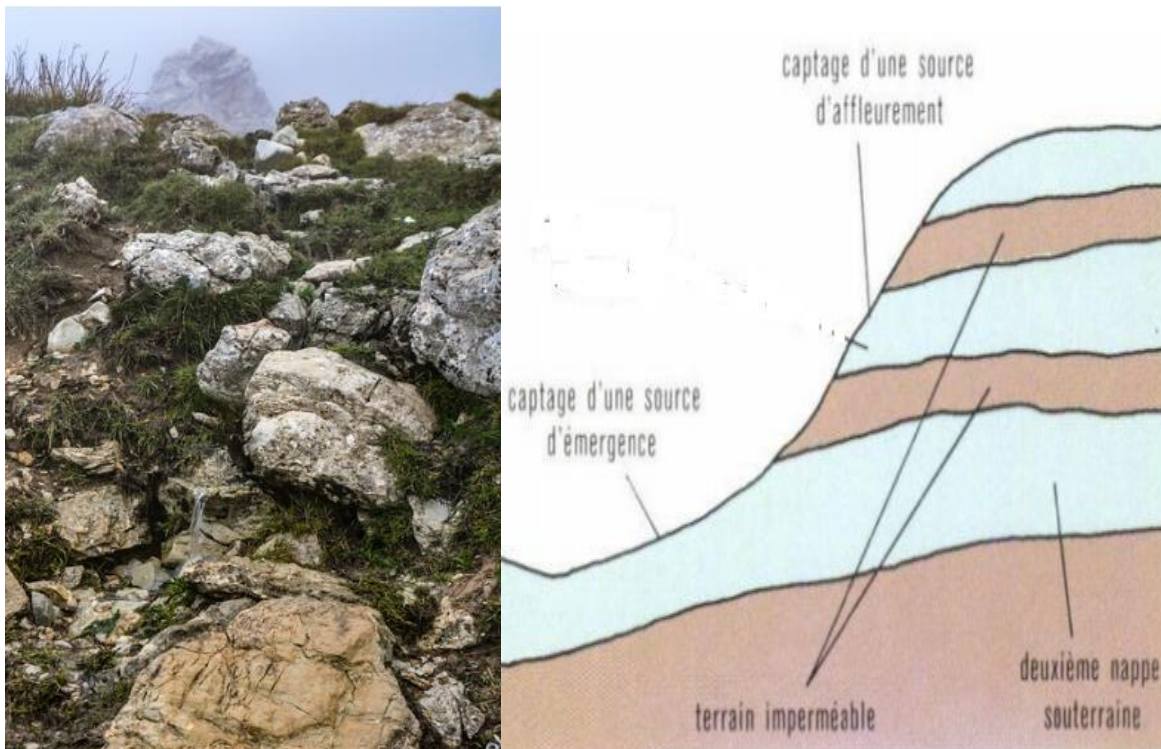


Fig. 27 Source d'affleurement (monts de Djurdjra à gauche)

Le captage de ce type de source peut être d'un aménagement simple (fig. 28a) ou avec réservoir (fig. 28b) selon l'importance de la source :

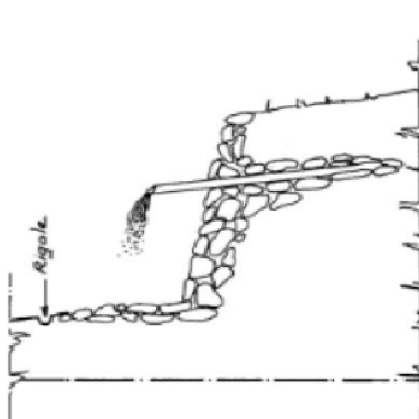


fig. 28a

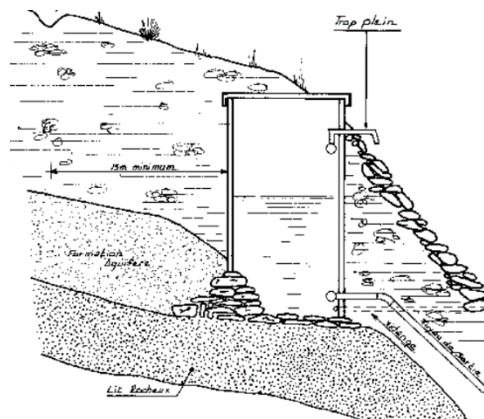


fig. 28b

L'aménagement simple (fig.28a) de source doit débuter par un nettoyage de l'endroit où l'eau sort du sol. Il faut faire une tranchée horizontale sur plusieurs mètres pour rechercher l'eau un peu plus loin ; remplir la tranchée de gros cailloux pour que l'eau circule facilement ; reboucher la tranchée ; à l'extrémité, sceller un tuyau par lequel l'eau s'écoulera. Le tuyau doit être scellé dans un mur fait en ciment, en parpaing ou en pierre ; le sol, à l'endroit où le tuyau sort, doit être nivelé et recouvert

de cailloux pour éviter qu'il y ait formation d'un borbier et réaliser une rigole qui évacue au loin l'eau sale.

L'aménagement avec réservoir (fig. 28b) nécessite de construire une chambre maçonnée qui permet de récupérer et de stocker l'eau de la source. L'aménagement extérieur est identique à celui de l'aménagement simple.

- b) Les sources d'émergence (fig.29) sont celles qui apparaissent là où la surface topographique recoupe la surface piézométrique d'un aquifère. Ces sources sont alimentées par la partie supérieure de la nappe. Le fond de la vallée n'atteint pas l'imperméable. Ces sources apparaissent dans les fonds des vallées et nécessitent un aménagement spécifique.

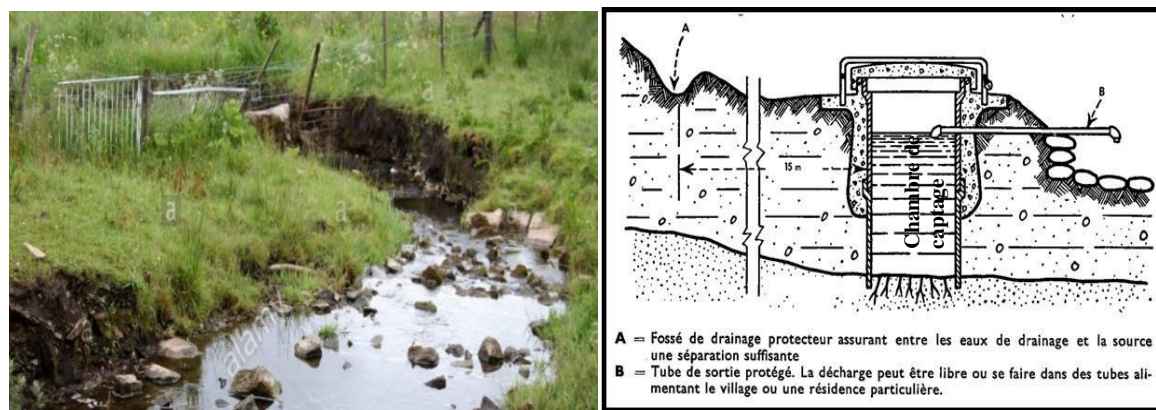


Fig. 29 Source d'affleurement et captage

II.2 Captage des eaux de surfaces

L'eau douce nécessaire à l'alimentation des cultures peut être soustraite à divers types de réservoirs : un barrage, une source, un cours d'eau, un lac de retenue naturel ou artificiel.

Donc La domination de plan d'eau peut s'appliquer à un grand nombre de surfaces de nature très différente les unes des autres, ce qui rend très difficile l'art de la prise d'eau. On distingue :

Les plans d'eau naturels : sources, ruisseaux, rivières, oueds, fleuves, estuaires, étangs, lacs, lagunes, mers, ...

Les plans d'eau artificiels : barrages, retenues collinaires, canaux, bassins, ports...

Notons que, compte tenu du caractère climatique semi- aride et aride (manque et mauvaise répartition de la pluviométrie, sécheresses,...) en Algérie, où la quasi-totalité de notre agriculture est menée en irrigué, et un réseau hydrographie en l'état de manque d'écoulements d'eau, notre pays a œuvré durant les années 70 et 80 pour le développement de la moyenne et grande hydraulique, à savoir la réalisation de grands barrages et retenues pour couvrir nos besoins en eau potable et énergétiques et tout particulièrement agricoles.

Ainsi, le captage des eaux de surface est assuré essentiellement par les barrages –réservoirs qui soit, positionnés en exutoires, à l'aval de bassins versants, accumulent les eaux des précipitations tombant à leur amont, soit constituant des retenues collinaires recevant des eaux de oueds et qui par pompage desservent les périmètres irrigués, (figures n°30 et 31).



Figure n° 30 : Barrage réservoir de Sidi Yagoub (W. Chlef).



Figure n°31 : Retenue de Merdja Sidi -Abed (W. Relizane).

II.2.1- Les barrages réservoirs

II.2.1.1 – Définitions

L'homme de tout temps et de toute civilisation a cherché à domestiquer l'eau par des dérivations, des canaux pour la conserver, l'utiliser ou s'en protéger en période de crue. Un barrage est un ouvrage artificiel qui coupe un cours d'eau (fig.32). Donc c'est un ouvrage artificiel disposé en travers d'un cours d'eau pour arrêter son écoulement, créer une retenue ou élever le niveau de l'eau en amont (fig.33).



Figure 32 : Barrage Boukoudane (Algérie)

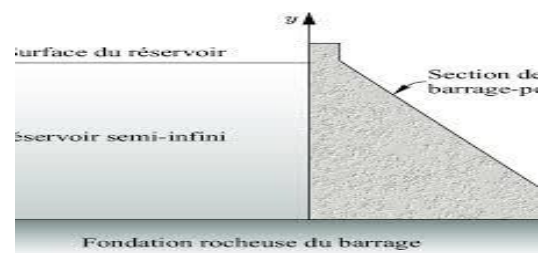


Figure 32 : Schéma de principe d'un barrage

Mais la principale raison qui conduit à réaliser des barrages est le stockage d'un grand volume d'eau pour qu'il soit disponible en cas de besoin. Un barrage donne à l'homme un réservoir d'eau, d'où l'appellation de barrages-réservoirs (fig.30).

Ce stockage est beaucoup plus économique qu'avec d'autres types de réservoirs. Le volume de ce réservoir est appelé la capacité.

La capacité et les conditions d'utilisation du réservoir font la justification du barrage. La capacité du réservoir est susceptible d'être employée pour :

- l'irrigation des terres cultivées,
- l'alimentation en eau potable des collectivités humaines,
- la réduction des débits maximaux des crues,
- le stockage de l'eau pour la production d'énergie dans une chute équipée d'une usine électrique,
- la dérivation de l'eau dans un canal,
- l'utilisation touristique et sportive d'un plan d'eau,
- l'élevage des poissons,
- lutte contre les incendies,
- création de polders,
- protection des estuaires contre les remontées d'eau de mer,
- la récupération des matériaux entraînés par le cours d'eau.

Un barrage est souvent construit pour assurer plusieurs des finalités énumérées ci-dessus.

II.2.1.2.- Classification

Elle permet de distinguer les différents types de barrages. La forme de la vallée, la nature du sol, les matériaux à disposition sur le site déterminent le type de barrage. Les barrages sont construits en béton ou en maçonnerie ; les digues (ou barrages en remblai) sont en terre ou en enrochement. La géologie (nature des roches sur lesquelles sera édifié le barrage, agrégats extraits sur place) et la topographie (largeur de la vallée), commande le type de barrage utilisé.

a) Le barrage-voûte

C'est un ouvrage particulièrement élégant ; en raison de la forme arquée du barrage, horizontalement et verticalement, la poussée de l'eau est reportée sur les flancs de la vallée (fig.33).

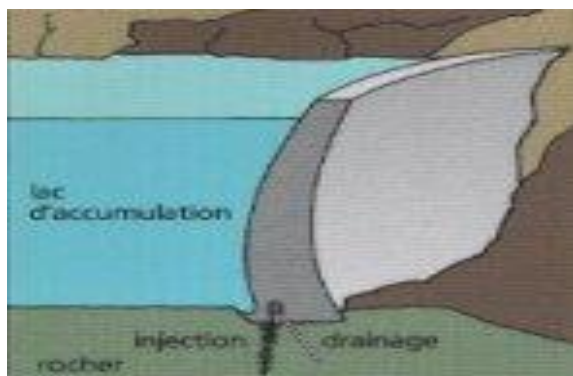


Figure 33a : Coupe type d'un barrage voûte



Figure 33b : Vue d'un barrage voûte

La hauteur du barrage fait 44m, avec une longueur de crête de 155m et largeur de 7m.



Figure. 33c barrage voûte Tichi haf(W. Bejaia)

b) Barrage poids

Il a, en principe, dans une coupe verticale, une forme triangulaire. Son poids suffit seul à contenir la poussée de l'eau. Une solution intermédiaire consiste à réaliser un barrage-poids/voûte. Sa stabilité est alors assurée en partie par son poids et en partie par son appui sur les rives (fig.34).

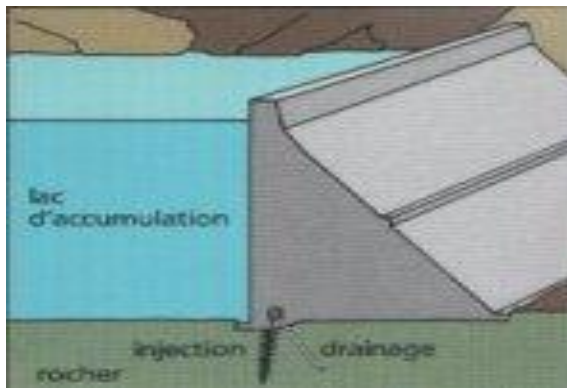


Figure. 34a coupe type d'un barrage poids



Figure 34b : Vue d'un barrage voûte



Figure. 34c barrage poids de Beni Haroun(W.Mila)

Le barrage de Beni Haroun est un barrage de type poids, situé à l'extrême nord de la wilaya de Mila, au nord-est de l'Algérie. D'une hauteur de 118 m, il est le plus grand barrage en Algérie avec une capacité de 960 millions m³.

c) Barrage Le barrage à contreforts

C'est un grand mur en béton qui s'appuie sur des contreforts en laissant des évidements, économisant ainsi du béton. Les contreforts, relativement minces, conduisent les efforts jusqu'aux fondations (fig. 35). Ce mode de construction se subdivise en sous-catégories ; contreforts à têtes arrondies à masque amont, à voûtes multiples (fig. 35c).

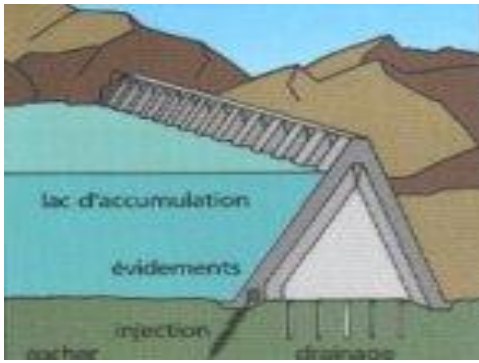


Figure. 35a coupe type d'un barrage à contreforts Figure 35b : Vue d'un barrage à contreforts



Figure 35c : Barrage à contreforts de Beni Bahdel (W.Tlemcen)

d) *Barrage digue (enrochement, remblai)*

Un barrage en remblai ou enrochement appelé aussi digue est un barrage constitué d'un matériau meuble, qu'il soit très fin ou très grossier (enrochements) (Fig. 36).

Cette famille regroupe plusieurs catégories, très différentes. Les différences proviennent des types de matériaux utilisés, et de la méthode employée pour assurer l'étanchéité.

Le barrage homogène est un barrage en remblai construit avec un matériau suffisamment étanche (argile, limon). C'est la technique la plus ancienne de barrages en remblais.

Le barrage à noyau argileux comporte un noyau central en argile (qui assure l'étanchéité), épaulé par des recharges constituées de matériaux plus perméables. Cette technique possède au moins deux avantages sur le barrage homogène : (1) les matériaux de recharge sont plus résistants que les matériaux argileux, on peut donc construire des talus plus raides et (2) on contrôle mieux les écoulements qui percolent dans le corps du barrage.

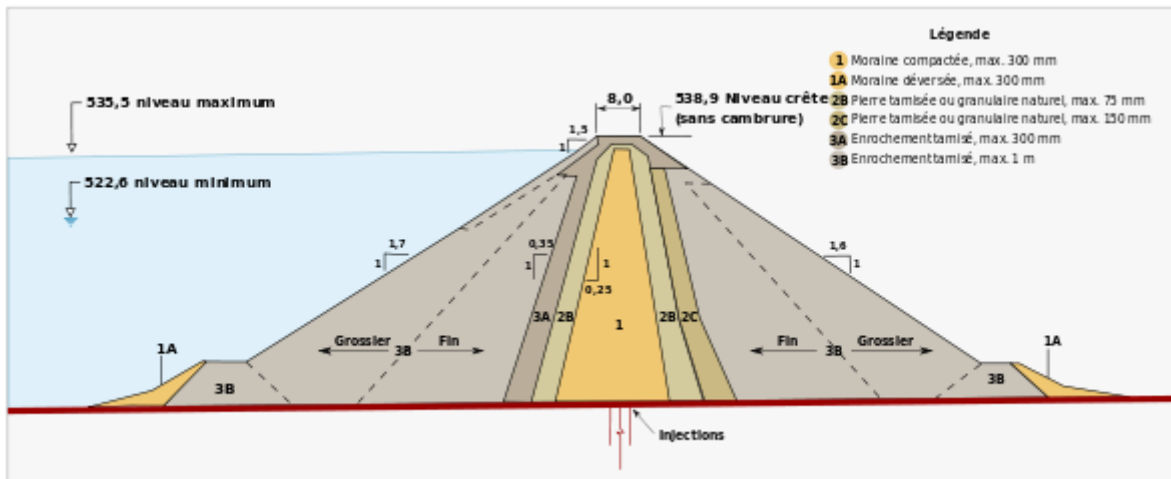


Figure 36a : Coupe de profil d'un barrage en remblai (enrochement, digue)



Figure 36b : Barrage de Sidi Yacoub (W. Chlef)

Le barrage Sidi Yacoub est situé sur l'Oued Ardjem à 20 kilomètres au Sud de la ville d'Oued Fodda dans la Wilaya de Chlef. Sa capacité est de 286 hm³, Il est destiné a :

- L'irrigation d'un périmètre de 10 000 ha environ
- L'alimentation en eau potable de la wilaya cheliff.

La surface du bassin versant de l'oued ARDJEM est de 920 KM². Dont l'apport moyen annuel de l'oued est de 98 hm³/an. L'envasement moyen annuel est de 0.17 hm³/an.

II.2.1.3.- Eléments d'un barrage réservoir

Le barrage doit être pourvu d'un dispositif qui permette de laisser passer l'eau que la retenue ne peut stocker, en particulier celle des crues. Cet organe est appelé déversoir pour les petits barrages, ou évacuateur de crues. Barrage et évacuateur de crue peuvent être confondus. On parlera alors d'un barrage déversant.

Il doit être équipé d'une vidange de fond, appelée bonde dans les étangs des temps anciens. Cette vidange permet de vider la retenue si cela est nécessaire et de rester maître de la montée du niveau dans la retenue.

Le dernier ouvrage annexe est constitué par la ou les prises d'eau qui servent à assurer la fonction pour laquelle a été conçu le barrage, alimentation d'un réseau d'irrigation, alimentation en eau potable, alimentation d'une usine hydroélectrique.

a.- L'évacuateur de crue

La maîtrise des crues est un élément fondamental de la sécurité des barrages ; elle est en grande partie fonction du dimensionnement des évacuateurs de crues et de leur fonctionnement.

Un évacuateur de crue est un ouvrage annexe au barrage permettant l'évacuation des débits de crue, constitué généralement d'un système d'entonnement (prise d'eau), de contrôle, d'un coursier et d'un dissipateur d'énergie. Il existe plusieurs formes d'évacuateurs de crue (fig. 37).



a)



b)



c) b. Sidi Yacoub

Fig. 37 a Evacuateur de crue en saut de ski (a), en escaliers (b) et en tulipe

b.- L'évacuateur ou vidange de fond (fig.38)

(2) Elle permet d'abaisser le plan d'eau en cas de besoin ou de vider complètement la retenue. Elle peut également être utilisée pour évacuer les sédiments qui se déposent dans la retenue.



Figure 38 : Parement amont du barrage avec ses annexes

c.- La prise d'eau (fig.38)

(1) Elle permet de capter l'eau de la retenue et de la conduire à travers une conduite, une galerie ou un canal vers une centrale hydroélectrique ou tout autre ouvrage permettant l'irrigation ou l'alimentation en eau potable. Une vanne destinée à l'irrigation peut y être associée (3).

II.2.1.4.- Problèmes des barrages réservoirs : Cas des barrages algériens

Le phénomène de l'envasement des barrages est l'aboutissement d'un processus naturel d'érosion des bassins versants et du sapement des berges des cours d'eau. Ce phénomène naturel enregistre les valeurs les plus élevées dans les régions arides et semi arides comme le Maghreb et plus particulièrement l'Algérie. Dans le pays, plus de 110 barrages en exploitation totalisant une capacité de 4,5 milliards de m³ et permettant de régulariser un volume annuel de 2 milliards de m³ utilisées pour l'A.E.P., l'industrie et l'irrigation.

Sous l'effet de l'érosion hydrique (précipitations) au niveau des bassins versants pas suffisamment couverts par la végétation, annuellement 20 millions de m³ d'eau sont perdus suite aux dépôts des sédiments dans les retenues.

Les solutions ce problème consistent en amont à protéger contre l'érosion, les bassins versants par une couverture végétale et reboisement. Dévaser en aval au niveau des retenues des barrages en appliquant différentes techniques (vidange d'entretien, dragage,.....)

II.2.1.5 .- Hydraulique des barrages

L'un des paramètres dans le dimensionnement des barrages, est calcul de leur stabilité renversement.

La stabilité globale d'un barrage se décline en 3 composantes :

1. *stabilité au glissement* : Sous l'effet de la poussée de l'eau, le barrage tend à glisser sur sa base. C'est le poids de l'ouvrage et son ancrage — fer dans le cas d'un soubassement rocheux, semelle et fondations sur sol meuble — qui empêchent le glissement.

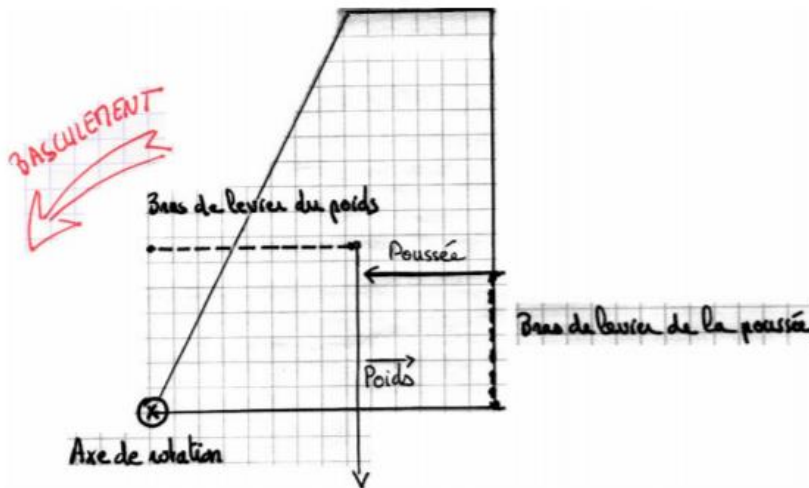
2. *Stabilité au poinçonnement* : (pour les ouvrages sur sol meuble). Dans le cas des ouvrages sur sol meuble, semelle et fondations doivent être dimensionnées pour que l'ouvrage ne s'enfonce pas sous son propre poids.

3. *Stabilité au renversement* : sous l'effet de la poussée de l'eau, l'ouvrage tend à basculer vers l'avant (mouvement de rotation autour du pied aval). C'est le poids de l'ouvrage qui s'oppose à cet effet de renversement.

On ne s'intéressera ici qu'aux règles de dimensionnement qui garantissent la stabilité au renversement. Il conviendra donc de s'assurer également que l'ouvrage n'est pas susceptible de s'enfoncer, ni de glisser.

Le calcul permettant de s'assurer de la stabilité au renversement d'un ouvrage est systématiquement réalisé afin de vérifier que le barrage à construire sera stable. Pour cela, on considère qu'il faut que le moment stabilisateur de l'ouvrage soit au moins deux fois supérieur au moment de renversement.

Calcul de la stabilité à l'envasement



Le barrage est soumis à la force de poussée de l'eau qui entraîne un mouvement de rotation autour du pied aval et son propre poids qui tend à le stabiliser en s'opposant à cette rotation.

Comme tout mouvement de rotation, le renversement de l'ouvrage est déterminé par le moment des forces, c'est à dire le produit des forces par leur bras de levier :

$$M_{\text{poids}} = \text{moment du poids} = \text{poids} * \text{bras de levier du poids}$$

$$M_{\text{poussée}} = \text{moment de la poussée} = \text{poussée} * \text{bras de levier de la poussée}$$

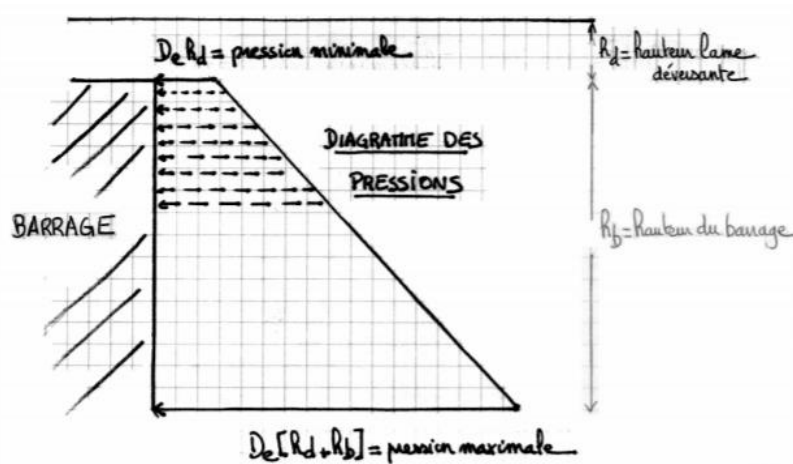
Théoriquement, l'ouvrage est en équilibre si : $M_{\text{poids}} = M_{\text{poussée}}$

En pratique, on applique un coefficient de sécurité et on considère que l'ouvrage est stable si $M_{\text{poids}} = 2 * M_{\text{poussée}}$

Etudier la stabilité au renversement d'un barrage revient donc à comparer le moment stabilisateur (moment du poids) et le moment de renversement (moment de la poussée de l'eau).

Calcul du moment de la poussée de l'eau

Pour le calcul de la poussée, en chaque point du mur amont du barrage, l'eau exerce une pression perpendiculaire à la surface de ce mur. Cette pression croît proportionnellement à la profondeur selon la loi $P = D_e \cdot h$ ($D_e = 1000 \text{ kg / m}^3$: Densité de l'eau (kg / m^3), ; h : Profondeur (m))



L'ensemble des pressions représentées dans le diagramme des pressions dessine un trapèze rectangle. La force de poussée est la résultante (l'intégrale) de l'ensemble de ces forces de pression et est égale à l'aire de ce trapèze rectangle.

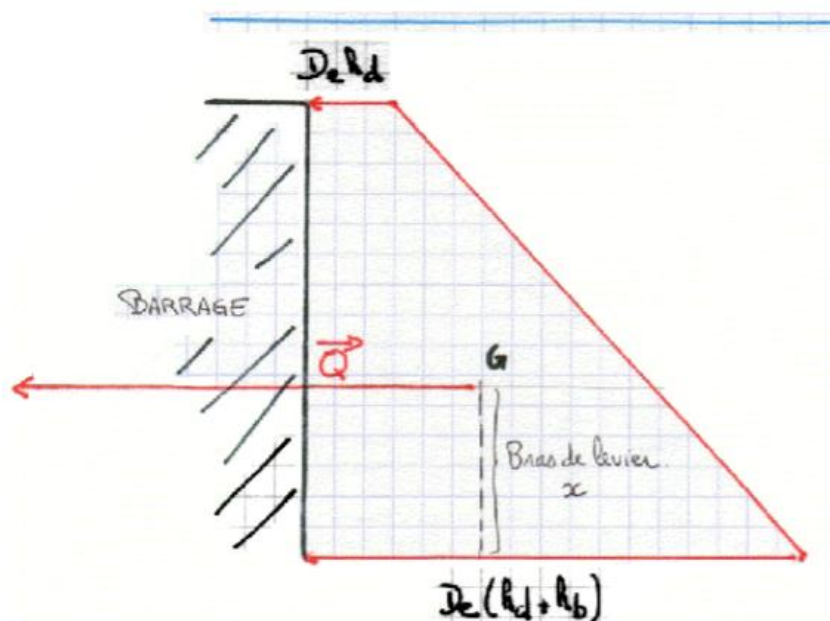
$$Q = h_b \frac{D_e(h_d + h_b + h_d)}{2} \quad \Rightarrow \quad Q = D_e h_b \left(h_d + \frac{h_b}{2} \right)$$

Remarques : La poussée est fonction du carré de la hauteur du barrage. En simplifiant, multiplier la hauteur d'un ouvrage par 2, revient à quadrupler la poussée qu'il subit.

La hauteur de lame déversante h_d varie en fonction du débit du cours d'eau. Pour le dimensionnement, on doit retenir des valeurs défavorables correspondant aux fortes crues. Dans la pratique, nous ne disposons d'aucune donnée sur les débits de crue et retenons des estimations subjectives.

Détermination du point d'application

Pour calculer x , le bras de levier de la poussée, il faut connaître son point d'application. Il se situe au centre de gravité du diagramme des pressions, c'est à dire du trapèze rectangle délimité par les pressions minimale et maximale.



D'après le calcul du barycentre d'un trapèze rectangle :

$$x = \frac{h_b}{3} \cdot \frac{2h_d + h_d + h_b}{h_d + h_d + h_b} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{h_b(h_d + \frac{h_b}{3})}{2h_d + h_b}$$

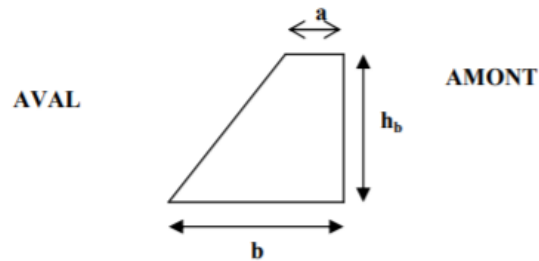
Moment de renversement

Le moment de renversement (de la poussée de l'eau) est donc :

$$\mathcal{M}_{\text{renv}} = Q \cdot x \text{ (kg.m).}$$

Calcul du moment du poids du barrage

Le calcul de l'intensité du poids sera fait pour une longueur de 1 mètre d'un barrage de section « trapèze rectangle » :



a est la petite base, b la grande base. On note D_b la masse volumique (densité) du béton que l'on exprime en kg/m^3 , la surface de la section est :

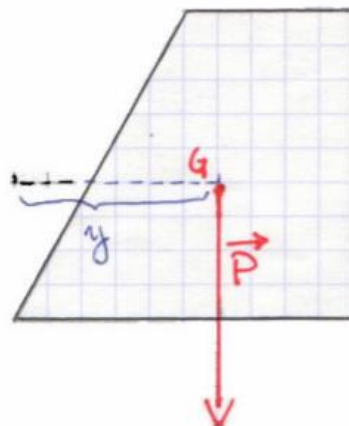
$$S = \frac{(a+b)}{2} \cdot h_b$$

Et le poids d'un mètre de barrage est donc

$$P = D_b \cdot \frac{h_b(a+b)}{2}$$

Calcul du bras de levier du poids :

Le poids s'applique au centre de gravité du barrage :



y est le bras de levier du poids. On a $y = \frac{1}{3} \left[2(b-a) + \frac{a(a+2b)}{b+a} \right]$
(d'après annexe sur calcul du barycentre d'un trapèze rectangle)

Moment de stabilisation

Le moment de stabilisation est donc : $m_{stab} = P \cdot y$ (kg.m)

