

Guide technique du développement des ressources en eau

Construction d'infrastructures hydrauliques adaptées aux conditions locales :
puits, mares et mini-barrages



Mars 2001

Documentation technique de la JGRC

Générer l'abondance dans le Sahel par la lutte contre la désertification

La présente documentation technique de la JGRC, composée de 8 guides, s'adresse aux techniciens impliqués dans la lutte contre la désertification par le biais des activités agricoles des communautés rurales.

Vol. 1 Guide technique de l'établissement de projets des mesures de lutte contre la désertification

Ce guide propose des techniques de planification pour le développement agricole et des communautés rurales axé sur la participation des habitants à la lutte contre la désertification. Il intègre les diverses techniques expérimentées par la JGRC dans le Sahel, en tenant compte des conditions naturelles, historiques et socio-économiques de cette région.

Vol. 2 Guide technique de la formation d'organisations d'habitants

Ce guide entend fournir aux habitants les moyens de former, de leur propre initiative, les associations communautaires nécessaires à une utilisation et à une gestion responsables et durables des ressources naturelles locales, sur la base des méthodes de gestion autonome.

Vol. 3 Guide technique du développement des ressources en eau

Ce guide présente une méthodologie pour connaître les réserves de ressources en eau, ainsi que des techniques relatives à l'aménagement des mares et à la mise en place de mini-barrages et de puits.

Vol. 4 Guide technique de l'utilisation des ressources en eau

Ce guide aborde notamment la planification, la conception et l'aménagement d'ouvrages d'irrigation peu onéreux, de fonctionnement simple et d'entretien facile, pour les zones disposant d'un niveau déterminé de ressources en eau même pendant la saison sèche.

Vol. 5 Guide technique de la conservation des terres agricoles

Dans ce guide, sont identifiés les avantages et inconvénients des méthodes de conservation des terres agricoles applicables selon les conditions naturelles (dont notamment le relief, la nature du sol et les caractéristiques d'écoulement). Le guide inclut également une marche à suivre pour l'application de ces méthodes, ainsi que des exemples concrets.

Vol. 6 Guide technique de l'agriculture

Ce guide présente des techniques pour l'augmentation du rendement de la riziculture irriguée, de la culture pluviale et de la culture des légumes et fruits, dans des environnements qui diffèrent du point de vue des ressources en sol et en eau, à savoir : les plaines d'inondation des oueds, les pentes et les plateaux.

Vol. 7 Guide technique de l'élevage

Dans ce guide sont présentées des techniques d'élevage semi-intensif qui, adaptées aux régions et d'un niveau accessible aux habitants, leur permettent de tirer avantage des ressources fourragères et animales.

Vol. 8 Guide technique du boisement

Ce guide présente des techniques de boisement de petite envergure pour exploitants individuels, dans une perspective agroforestière permettant l'utilisation et la fourniture de sous-produits forestiers sur une base stable.

Introduction

A l'occasion de la grande sécheresse qu'a subi en 1984 le Sahel, situé à l'extrémité Sud du Sahara, la Société Japonaise des Ressources Vertes (JGRC : Japan Green Resources Corporation) a entrepris l'étude de mesures de lutte contre la désertification dans cette région du globe que l'on dit la plus sérieusement affectée par la progression de la désertification.

Dans une première étape (1985-1989), afin de connaître l'état de progression de la désertification et d'en analyser les causes, la JGRC a collecté des données de base dans le bassin du fleuve Niger, qui traverse le Sahel dans sa longueur. Cette étude a révélé qu'en plus des causes naturelles (dont notamment les sécheresses), la progression de la désertification est étroitement liée à des facteurs humains découlant de la croissance démographique, à savoir : l'agriculture excessive, le surpâturage et la collecte excessive de bois de feu.

Sur la base de ce constat, la JGRC a conclu que pour mettre un frein à la désertification, la stabilité du cadre de vie des habitants de la région revêt une grande importance, et que, du point de vue des activités agro-sylvo-pastorales, une transition s'impose d'un modèle de type usurpateur à un modèle de type durable en harmonie avec l'environnement naturel.

Dans une seconde étape (1990-1995), elle a aménagé une ferme expérimentale d'environ 100 ha dans le village de Magou, situé aux environs de Niamey, la capitale du Niger. Avec la collaboration des habitants, elle y a expérimenté et évalué diverses techniques nécessaires au développement durable des communautés agricoles, dont notamment des techniques de développement des ressources en eau, de conservation des terres agricoles, d'agriculture, d'élevage et de boisement. De plus, elle a établi un plan type de lutte contre la désertification pour la zone de Magou (environ 1.800 ha) en appliquant ces techniques, et présenté ainsi un exemple de développement des communautés agricoles.

Dans une troisième étape (1996-2000), tout en poursuivant ses expérimentations sur des techniques de nature applicable, la JGRC a bénéficié de la participation des habitants du village de Magou pour la mise à l'essai d'une partie du plan type de lutte contre la désertification. Cela lui a permis, dans un premier temps, de connaître les problèmes relatifs au système cadastral et social soulevés lors de l'exécution d'un tel projet avec la participation des habitants, et, dans un deuxième temps, de rechercher avec ces derniers des façons de résoudre ces problèmes. Par ailleurs, afin de vérifier leur polyvalence, la JGRC a appliqué aux villages de Yakouta au Burkina Faso et à plusieurs villages du cercle de Ségou au Mali, les techniques élaborées jusque-là au Niger dans des conditions naturelles différentes (précipitations, etc.).

En deux mots, les études de la JGRC se caractérisent par l'acquisition ① de techniques de développement agricole utilisant efficacement l'eau des oueds (cours d'eau dont l'écoulement se limite à la saison des pluies) dans les plaines d'inondation, ces dernières étant relativement fertiles mais peu utilisées, et ② de techniques de développement global et durable de l'agriculture, centrées sur la conservation des sols des terrains en pente douce et le rétablissement de la productivité des sols où se trouvent les villages.

Les présents guides compilent des techniques de développement des communautés agricoles, facilement applicables par les autochtones et permettant la lutte contre la désertification dans le Sahel. Ces techniques ont été élaborées par la JGRC au cours des études précitées, avec la collaboration des habitants.

Ces guides techniques font l'objet d'une division en huit domaines, à savoir : l'établissement de projets des mesures de lutte contre la désertification, la formation d'organisations d'habitants, l'exploitation des ressources en eau, l'utilisation des ressources en eau, la conservation des terres agricoles, l'agriculture, l'élevage et le boisement.

Il est souhaitable que ces informations techniques soient utilisées par un grand nombre de personnes impliquées dans les mesures de lutte contre la désertification. Pour cela, conjointement avec l'Autorité du Bassin du Niger (ABN), la JGRC a établi un bureau d'information au Secrétariat Exécutif de l'ABN pour la lutte contre la désertification, et des informations techniques sont disponibles par Internet.

Nous souhaitons que ces guides techniques soient utilisés par de nombreuses personnes dans plusieurs pays, et qu'ils contribuent ainsi à l'avancement des mesures de lutte contre la désertification.

De nombreuses personnes du Japon et de l'étranger ont collaboré à la rédaction de ces guides techniques.

Nous souhaitons plus particulièrement remercier ici le Secrétariat Exécutif de l'ABN, le Niger, le Burkina Faso, le Mali, les pays membres de l'ABN, les techniciens des nombreux pays qui ont contribué à cette étude, ainsi que les habitants des zones concernées.

Mars 2001

Shigeo KARIMATA

Directeur

Département des activités outre-mer

Société Japonaise des Ressources Vertes

Guide technique du développement des ressources en eau

Tables des Matières

Chapitre 1 Synthèse

1.1 Contexte	2
1.2 Objectif	2

Chapitre 2 Points à considérer pour le développement des ressources en eau

2.1 Procédure du développement des ressources en eau	4
2.2 Comment effectuer le diagnostic de la situation des ressources en eau	5
2.2.1 Etude au bureau	5
2.2.2 Reconnaissance sur place	7
2.2.3 Etude d'observation	7
2.2.4 Etude détaillée	7
2.2.5 Analyse des résultats d'étude	7
2.3 Utilisation durable des ressources en eau	7

Chapitre 3 Etude de l'état actuel des ressources en eau

3.1 Aperçu de l'étude de l'état actuel des ressources en eau	10
3.2 Etude climatique	12
3.2.1 Situation climatique actuelle et objectifs de l'étude	12
3.2.2 Méthodes d'étude	12
1) Collecte de documents	12
2) Observation des précipitations	12
3) Observation du volume évaporé etc.	14
3.2.3 Analyse des résultats d'étude	14
1) Précipitations stochastiques	14
2) Estimation de l'évapotranspiration	15
3.3 Etude des eaux de surface	18
3.3.1 Etat des eaux de surface et objectifs de l'étude	18
3.3.2 Méthode de l'étude	19
1) Etude topographique	19
2) Observation du niveau d'eau	20
3) Observation du débit	20
4) Analyse de la qualité de l'eau	22
3.3.3 Analyse des résultats d'étude	24
1) Calcul du niveau d'eau stochastique	24

2) Analyse de l'écoulement	25
3) Analyse du bilan hydrologique	27
3.4 Etude des eaux souterraines	28
3.4.1 Etat actuel des eaux souterraines et objectifs de l'étude	28
3.4.2 Méthode d'étude	29
1) Etude topographique	29
2) Etude géologique	30
3) Etude des puits actuels	30
4) Observation simultanée du niveau des eaux souterraines	31
5) Observation continue du niveau des eaux souterraines	32
6) Prospection électrique	33
7) Prospection par ondes sismiques	35
8) Etude par sondage	39
9) Etude par essai de forage	40
10) Essais de pompage	40
11) Etude de la qualité de l'eau	42
12) Etude du volume de pompage réel	42
3.4.3 Analyse des résultats de l'étude	43
1) Classification des couches aquifères	43
2) Analyse des essais de pompage	45
3) Analyse des variations du niveau des eaux souterraines	51

Chapitre 4 Techniques du développement des ressources en eau

4.1 Sélection des méthodes du développement des ressources en eau	52
4.2 Exploitation des eaux de surface par petits barrages	53
4.2.1 Sélection du site approprié à un petit barrage	53
1) Etude topographique	54
2) Etude géologique	55
3) Etude des matériaux	55
4) Etude hydrologique	55
5) Etude sociale	56
4.2.2 Définition des spécifications du barrage et conception	56
1) Types de petit barrage	56
2) Forme de la section transversale du talus	57
3) Taille de la sortie d'inondation	58
4) Calcul du volume d'écoulement	59
4.2.3 Période d'exécution	62

4.2.4	Gestion et maintenance des installations	62
4.2.5	Exploitation des eaux souterraines aux environs d'un barrage	62
4.3	Développement des ressources en eau par aménagement des mares	63
4.3.1	Aménagement des mares	63
4.3.2	Méthode d'aménagement des mares	63
1)	Surcreusement du sol	63
2)	Agrandissement du pourtour	64
3)	Construction d'une digue	65
4.3.3	Sélection du site adapté	65
1)	Définition de la portée de l'étude	65
2)	Etude des sites candidats à l'aménagement de mares	65
3)	Etude technique pour l'aménagement de mares	66
4)	Vérification de la disponibilité de matériau pour le génie civil	66
4.3.4	Profondeur de stockage d'eau de mares	66
4.3.5	Calcul du volume de stockage d'une mare	67
4.3.6	Installation d'une sortie d'inondation	67
4.3.7	Exploitation des eaux souterraines aux environs d'une mare	68
4.4	Exploitation des eaux souterraines par puits	68
4.4.1	Sélection de l'emplacement du puits	68
4.4.2	Sélection de la structure du puits	69
1)	Type de puits	69
2)	Profondeur des puits	73
3)	Tubage	74
4)	Filtre	74
5)	Ouvrage de la partie supérieure et environnantes du puits	74
4.4.3	Exécution d'un puits	76
4.4.4	Réhabilitation de puits	76
4.4.5	Gestion et entretien d'un puits	78
1)	Entretien de fonction d'un puits	78
2)	Conservation de la qualité de l'eau	78
3)	Système de maintenance et gestion	79

Chapitre 1 Synthèse

1.1 Contexte

La zone du Sahel est une zone semi-aride à précipitations annuelles d'environ 250 - 750 mm et évapotranspiration potentielle annuelle d'environ 1.800 - 3.000 mm (volume d'eau perdu par évapotranspiration si suffisamment d'eau est fourni à la surface du sol entièrement recouverte de végétation). La saison sèche et la saison de pluie sont clairement définies dans cette zone, les précipitations se concentrant pendant la saison de pluie. Les précipitations annuelles sont très variables d'une année à l'autre, et les années à précipitations faibles, des dégâts dus à la sécheresse apparaissent.

En dehors des grandes rivières, toutes les rivières sont des oueds (appelés cours d'eau saisonniers surtout en Afrique Occidentale. Ci-dessous appelés "oueds") qui ne s'écoulent que pendant la saison de pluie. Par ailleurs, des mares se forment dans les cuvettes pendant la saison de pluie, mais elles sont pratiquement toutes semi-permanentes.

Les réserves d'eaux souterraines existent dans les couches alluviales, les couches tertiaires et le socle etc. en tant que des eaux souterraines non pressurisées ou pressurisées. Le volume puisable par puits (dans le texte, abréviation incluant à la fois forages et puits peu profonds) est très variable selon les différences de conditions topographiques et géologiques. Ainsi les ressources en eau de la zone Sahel varient considérablement selon les zones et saisons, ce qui exerce une contrainte sur les conditions de vie et les activités des habitants de cette zone, et est une des causes principales de la progression de la désertification au cours des dernières années.

1.2 Objectif

L'objectif du développement des ressources en eau est d'assurer les ressources en eau requises pour l'eau potable, l'eau pour le bétail, l'eau d'irrigation, dans des zones où des restrictions pèsent actuellement sur la vie quotidienne et les activités de production des habitants du fait du manque de ressources en eau. L'exécution d'activités agro-sylvo-pastorales durables en utilisant les ressources en eau nouvellement acquises permettra la lutte contre la désertification par une utilisation adaptée des sols.

Le présent guide couvre les méthodes d'étude de la situation actuelle nécessaires pour le développement des ressources en eau et les techniques d'exploitation applicables.

Ce guide s'appuie sur les résultats d'étude et d'expérimentation obtenus au Mali, au Burkina Faso et au Niger par la JGRC.

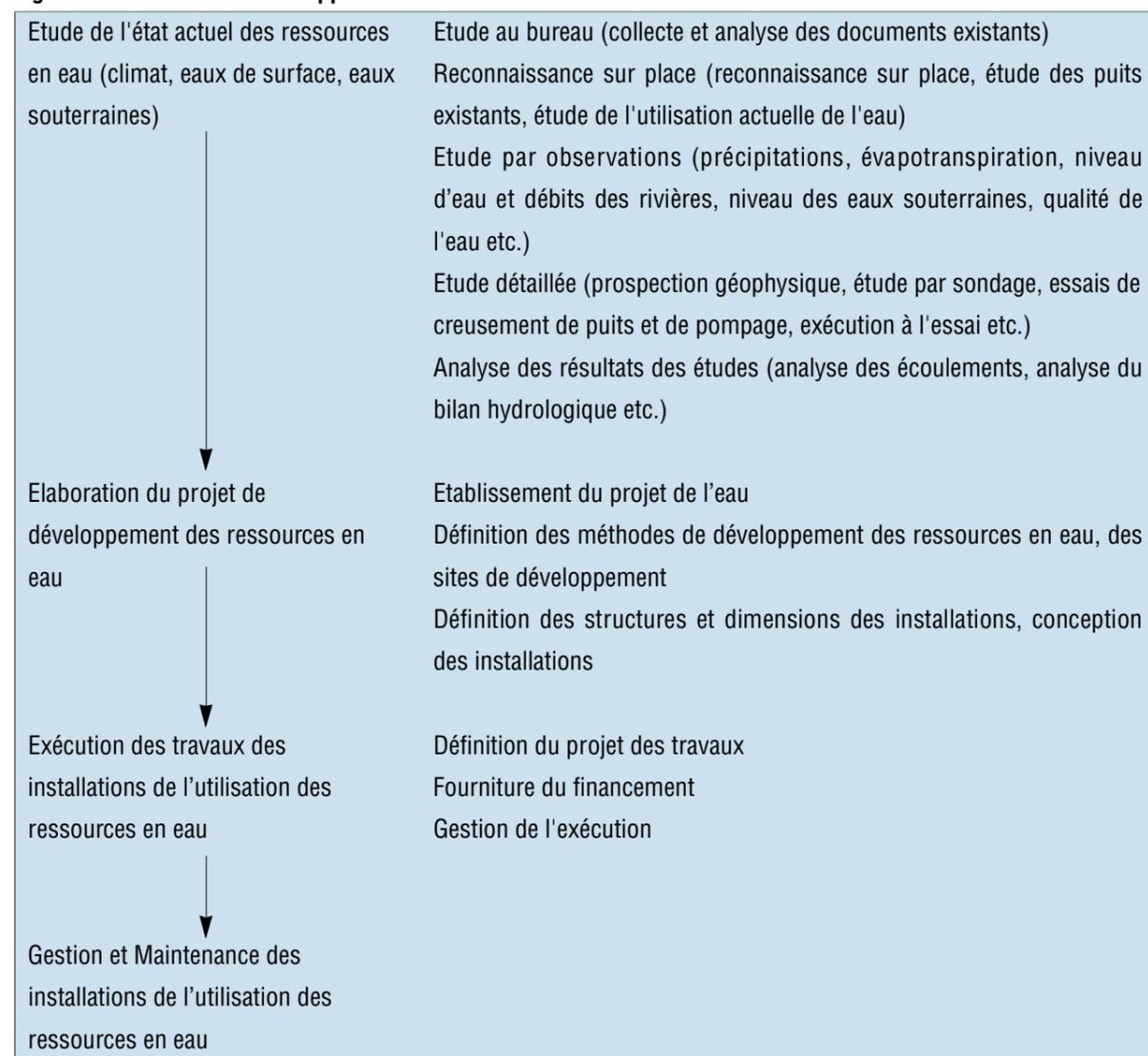
Chapitre 2 Points à considérer pour le développement des ressources en eau

2.1 Procédure du développement des ressources en eau

Pour le développement des ressources en eau, une étude de l'état actuel des ressources en eau est d'abord effectuée dans la zone concernée du développement des ressources en eau (dénommée ci-après "la zone concernée"), afin de saisir la forme des réserves et leur volume. Un projet du développement des ressources en eau est établi sur cette base. De plus à l'étape de l'exécution du projet, des installations prévues pour l'utilisation des ressources en eau, dont la gestion et maintenance sera assurée par la suite, seront construites.

Le développement des ressources en eau sera effectuée comme le montre la Figure 2.1.1.

Fig. 2.1.1 Procédure du développement des ressources en eau



2.2 Comment effectuer le diagnostic de la situation des ressources en eau

La forme de réserve des ressources en eau utilisables dans la zone concernée, varie largement en fonction des conditions hydrologiques tels que le climat, relief, géologie de la zone. Il arrive aussi que les ressources en eau à l'exploiter soient limitées par leurs objectifs, les emplacements qui nécessitent les ressources en eau, la méthode d'approvisionnement, le volume et la qualité d'eau requis etc. Par exemple, dans une zone à proximité d'un oued (appelés cours d'eau saisonniers surtout en Afrique Occidentale. Ci-dessous appelés "oueds"), il est possible de considérer l'oued et les eaux souterraines comme ressources en eau à, et dans le cas de l'exploitation des deux, il faudra effectuer une étude des eaux de surface et des eaux souterraines. Par ailleurs, sur une péninsule éloignée des ressources en eaux de surface telles qu'oued et mare, il est difficile d'obtenir des ressources en eau autres que les eaux souterraines, et l'étude et le plan d'utilisation se limiteront aux eaux souterraines. Pour l'eau potable, qui exige des ressources en eau de qualité, elle est dans beaucoup de cas recherché dans les eaux souterraines.

Si les ressources en eau objets des actions de développement sont ainsi limitées selon la forme des réserves de ressources en eau de la zone concernée et les objectifs de développement des ressources en eau, il faudra sélectionner les éléments d'étude de l'état actuel et définir les quantités et la précision de l'étude.

L'étude de l'état actuel se fait ordinairement selon la procédure ci-dessous, et souvent sa précision est graduellement renforcée.

2.2.1 Etude au bureau

Le plus grand nombre de documents disponibles relatifs à la zone concernée, tels que cartes topographiques, cartes géologiques, photos aériennes, textes de revues scientifiques, rapport de projets exécutés, publications etc. sera collecté et analysé. Beaucoup de pays, dont la France, et des organisations internationales (BRGM ¹⁾, ORSTOM ²⁾ etc.) effectuent des études sur les ressources en eau dans le Sahel, et beaucoup de rapports et livres sont publiés. Les données existantes (donnée de l'installation hydraulique comme répertoire des puits etc., données de niveau d'eau et débit, données climatiques etc.) et les documents des organismes gouvernementaux etc. locaux seront aussi collectés.

Le Tableau 2.2.1 indique les rubriques de collecte des documents de l'étude au bureau et organismes fournisseurs.

Cela permettra de saisir la situation générale sur place, de sélectionner les zones permettant le développement des ressources en eau et d'établir les projets d'études subséquents.

¹⁾ BRGM : BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

²⁾ ORSTOM : OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Tableau 2.2.1 Rubriques de collecte des documents de l'étude au bureau et organismes fournisseurs

Rubriques de la collecte		Fournisseur
Relief et géologie	Images satellite	LANDSAT, SPOT etc.
	Photos aériennes	Organismes gouvernementaux de chaque pays etc.
	Cartes topographiques	Organismes gouvernementaux de chaque pays etc.
	Cartes géologiques	Organismes gouvernementaux de chaque pays, sociétés minières etc.
	Cartes de la végétation et d'utilisation du sol	Organismes gouvernementaux de chaque pays etc.
	Documents géologiques tels que sondages	Organismes gouvernementaux de chaque pays, sociétés minières, sociétés de forage etc.
Climat et hydrologie	Climat	Organismes gouvernementaux de chaque pays, organisations internationales etc.
	Niveau d'eau et débit des rivières	Organismes gouvernementaux de chaque pays, organisations internationales etc.
	Niveau des eaux souterraines	Organismes gouvernementaux de chaque pays etc.
	Température et qualité de l'eau	Organismes gouvernementaux de chaque pays etc.
Etat actuel de l'hydrauliques	Installations d'utilisation des eaux de surface	Organismes gouvernementaux de chaque pays, organisations des Nations Unies etc.
	Puits	Organismes gouvernementaux de chaque pays, organisations des Nations Unies, sociétés de forage etc.
	Volume d'eau utilisé	Organismes gouvernementaux de chaque pays etc.
Projet d'exploitation des ressources en eau	Lois, normes et plan d'action national concernant les ressources en eau	Organismes gouvernementaux de chaque pays etc.
	Projet de développement des ressources en eau	Organismes gouvernementaux de chaque pays, organisme du projet
Autres	Rapports d'études et de projets existants	Organisme du projet etc.
	Revue de sociétés scientifiques, publications	Diverses sociétés scientifiques, maisons d'éditions etc.

2.2.2 Reconnaissance sur place

Ensuite, une reconnaissance aura lieu sur place pour confirmer et compléter les informations obtenues par l'étude au bureau. Une étude sur place en vue de compléter la carte géologique, d'étudier l'emplacement et les caractéristiques de puits, de saisir l'état d'utilisation de l'eau et les problèmes etc., ainsi qu'une enquête par interview auprès des habitants seront réalisées.

Ces études permettront de confirmer quelles études devront être réalisées dans l'avenir.

2.2.3 Etude d'observation

Des sites conformes aux objectifs de l'étude seront sélectionnés, et l'observation des conditions hydrologiques et climatiques telles que précipitations, évapotranspiration, niveau d'eau et débit des rivières, niveau des eaux souterraines, commenceront. Ces observations devront être commencées au plus tôt pour pouvoir obtenir les données requises dans la période limitée impartie. L'analyse de la qualité d'eau des eaux de surface et des eaux souterraines sera aussi faite si nécessaire.

2.2.4 Etude détaillée

Les sites candidats au développement des ressources en eau ayant été concrètement triés lors des études jusque là, l'étude détaillée pour la prospection des ressources en eau sera entreprise. Des prospections géophysiques, des sondages, des puits d'essai, des essais de pompage etc. seront effectués si l'exploitation porte sur les eaux souterraines. Des travaux d'essai pour petit barrage, et le surcreusement de mares naturelles auront lieu si l'exploitation porte sur des eaux de surface.

2.2.5 Analyse des résultats d'étude

L'analyse de l'écoulement et l'analyse du bilan hydrologique auront lieu sur la base des résultats des études ci-dessus. Les résultats des études seront également analysés en bloc, et la réserve de ressources en eau et le volume exploitable de la zone d'étude seront estimés, ce qui constituera des documents de référence pour l'établissement du projet de développement.

2.3 Utilisation durable des ressources en eau

Si l'on considère le bilan de l'eau d'une année hydrologique dans une zone donnée, l'eau fournie par les précipitations (P) s'écoule sous la forme d'évapotranspiration (E), sortie en surface (R) et pénétration dans le sol (G). La formule mathématique $P = E + R + G$ exprime cette relation.

Le volume de réserve des ressources en eau utilisables de manière durable est le volume des précipitations moins l'évapotranspiration, à savoir le volume de la recharge naturelle. Une utilisation d'eau dépassant ce volume se traduira en fin de compte par le tarissement des ressources en eau. Dans le Sahel à précipitations faibles et évapotranspiration élevée, il faut toujours garder ce fait à l'esprit pour le développement des ressources en eau. En particulier, le tarissement des eaux souterraines est possible en cas de pompage de grandes quantités d'eau des eaux souterraines profondes non circulantes. Par contre, les eaux souterraines non pressurisées à faible profondeur circulent, et sont des ressources à rétablissement facile par recharge de la surface, par exemple des précipitations. Ainsi, ses eaux souterraines non pressurisées peu profondes sont d'une importance permettant le

puisage, elles peuvent permettre une utilisation durable.

La construction des petits barrages et l'aménagement des mares laisse espérer l'augmentation de la recharge des eaux souterraines par extension de la plage d'inondation et prolongement de la période de maintien. Ce sont des méthodes efficaces pour l'utilisation durable des eaux souterraines.

Actuellement, le volume d'eau total réellement utilisé semble encore faible par rapport à la recharge naturelle des ressources en eau, ce qui permet de dire qu'une marge de développement existe encore. La question à résoudre dans l'immédiat sera de savoir comment exploiter le plus efficacement possible les ressources en eau encore inexploitées. Mais si l'exploitation des rivières et des eaux souterraines sont faites à grande envergure dans l'avenir, le problème de tarissement des ressources en eau peut s'aggraver, et doit donc être pris en compte dès maintenant.

Par ailleurs, la participation des habitants, bénéficiaires du projet, est indispensable pour assurer l'utilisation durable des installations mises en place dans le cadre d'un projet de développement des ressources en eau. Concrètement, une organisation villageoise sera formée, et chaque étape au niveau du village pour le développement des ressources en eau, allant de l'analyse de l'état actuel, la sélection des méthodes de développement, l'établissement des projets, l'exécution, à la gestion et la maintenance des installations, devra être effectuée de manière participative par les habitants. En particulier, la fourniture de la main-d'oeuvre et la prise en charge d'une partie des frais du projet est jugée souhaitable pour l'exécution des projets. Les habitants trouveront eux-mêmes les ressources financières pour assurer la gestion et la maintenance nécessaires pour l'exploitation durable des installations. Pour la gestion et la maintenance des puits, il y a des cas où un comité de gestion du puits formé par des habitants collecte les frais d'utilisation du puits, gère le fonds ainsi collecté, répare la pompe et nettoie périodiquement les environs du puits.

Chapitre 3 Etude de l'état actuel des ressources en eau

3.1 Aperçu de l'étude de l'état actuel des ressources en eau

L'étude de la situation actuelle aura lieu pour mettre au clair l'état des réserves des ressources en eau. Les résultats de cette étude seront les éléments les plus fondamentaux pour des analyses diverses et l'établissement du projet d'exploitation. Le Tableau 3.1.1 indique les rubriques de l'étude et ses objectifs.

Tableau 3.1.1 Rubriques de l'étude des ressources en eau et objectifs

Rubrique de l'étude		Objectifs de l'étude	Période d'exécution		
			Etape préparatoire	Etape de prévision	Etape de planification
Collecte de documents	Collecte de rapports existants, livres, cartes	Définition de la zone d'étude, Elaboration du projet d'étude	○		
	Collecte des données d'observation existantes	Analyses diverses	○		
Etude climatique	Observation des précipitations	Analyse de l'écoulement, Analyse du bilan hydrologique		○	
	Observation de l'évapotranspiration	Estimation de l'évapotranspiration		△	
	Observation de température, humidité, vitesse du vent, heures d'ensoleillement, degré d'ensoleillement, pression atmosphérique	Estimation de l'évapotranspiration		△	
Etude topographique	Collecte de cartes topographiques	Etablissement du projet d'étude, Compilation des résultats des études	○		
	Levés topographiques (nivellement topographique)	Définition de l'altitude des points de contrôle pour l'observation du niveau d'eau		○	
	Etablissement de cartes topographiques détaillées	Planification et conception des ouvrages		△	○
	Interprétation de photos aériennes	Remplacements topographiques, Classement topographique, Interprétation du linéament	○		
	Télé-détection	Saisie de l'état d'utilisation des sols, interprétation des structures géologiques de grande dimension	△		

Rubrique de l'étude	Objectifs de l'étude	Période d'exécution		
		Etape préparatoire	Etape de prévision	Etape de planification
Etude des eaux de surface	Observation du niveau d'eau		○	
	Observation du débit		○	
	Etude de la qualité de l'eau		○	
Etude des eaux souterraines	Etude sur place géologique	○		
	Etude des puits existants			
	Observation simultanée du niveau des eaux souterraines		○	
	Observation continue du niveau des eaux souterraines		○	
	Prospection géophysique		△	△
	Etude par sondage		△	△
	Etude par creusement de puits d'essai			○
	Essais de pompage			○
	Etude de la qualité de l'eau			○
Etude des volumes d'eau réellement pompés		△		

○ : Etude absolument souhaitable △ : Etude à exécuter si nécessaire

Etude de l'état actuel des ressources en eau

Etude de l'état actuel des ressources en eau

3.2 Etude climatique

3.2.1 Situation climatique actuelle et objectifs de l'étude

Les précipitations annuelles sont d'environ 250 à 750 mm dans le Sahel. Les saisons sèche et humide sont clairement définies, et il ne pleut pas du tout pendant la saison sèche de novembre à mars. Les précipitations sont concentrées de juin à septembre, et les variations annuelles des précipitations sont très importantes. Certaines années, il pleut également en avril-mai et octobre, mais les précipitations sont très faibles.

Par ailleurs, l'évapotranspiration potentielle annuelle va d'environ 1.800 à 3.000 mm, ce qui est plusieurs fois supérieur aux précipitations annuelles. Pendant la saison sèche, l'air est très sec, et bien que l'évapotranspiration potentielle soit importante, l'eau évaporable diminuant, l'évapotranspiration (évapotranspiration réelle) est pratiquement nulle dans les bassins. Pendant la saison de pluie, l'air est humide et l'ensoleillement faible, l'évapotranspiration potentielle est donc plus faible que pendant la saison sèche, mais l'eau évaporable étant présente dans les bassins, l'évapotranspiration réelle est importante. Le point ci-dessus doit être pris en compte pour l'estimation de l'évapotranspiration par calcul etc..

L'étude climatique est prévue pour déterminer l'importance des ressources en eau ajoutées dans le bassin de la zone concernée, et la relation entre les précipitations etc. et les eaux de surface et les eaux souterraines. Les résultats de l'étude climatique seront utilisés pour l'analyse statistique, l'analyse de l'écoulement, et l'analyse du bilan hydrologique, avec les objectifs suivants :

- ① Estimation du volume d'eau dans les barrages etc.
- ② Estimation du volume de la recharge des eaux souterraines
- ③ Estimation de l'ampleur des inondations
- ④ Etablissement du projet de l'eau pour l'irrigation

3.2.2 Méthodes d'étude

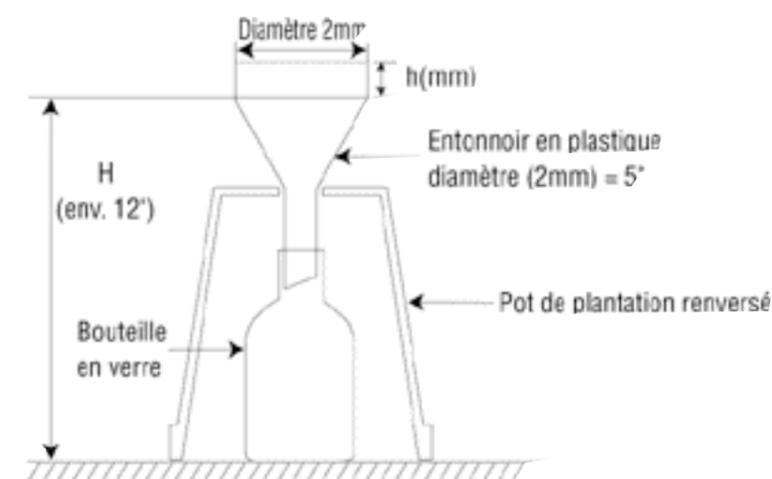
1) Collecte de documents

Les documents climatiques concernant l'ensoleillement etc. dans la zone concernée et les environs seront collectés. La collecte portera au moins sur les documents de ces dix dernières années, et si possible, ceux de plus de 20 ans sont souhaitables. Le plus grand nombre de données possible est souhaitable pour l'analyse statistique. Des documents sur la température, l'évaporation, l'humidité, la vitesse du vent, les heures d'ensoleillement et l'ensoleillement, la pression atmosphérique seront aussi collectés, en plus des documents sur les précipitations.

2) Observation des précipitations

Des pluviomètres seront installés pour l'observation des précipitations s'il n'existe pas d'installations d'observation dans la zone concernée. Il existe deux types de pluviomètre: pluviomètre à stockage d'eau et pluviomètre à basculeur. Le pluviomètre à stockage d'eau accumule la pluie dans un préleveur conique, le volume est mesuré par cylindre de mesure, et converti en profondeur (graduation ordinaire: 0,5 mm). Un pluviomètre de 22 cm de diamètre et 38 cm de hauteur est ordinairement utilisé en Afrique, mais la mesure est aussi possible simplement en utilisant une bouteille vide, comme le montre la Figure 3.2.1.

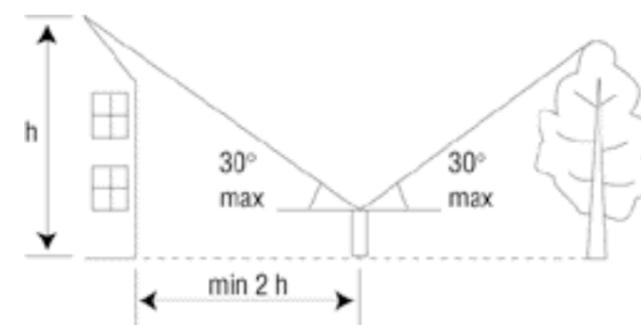
Fig. 3.2.1 Pluviomètre simple (Brassington, 1988)



Dans le pluviomètre à basculeurs, quand un certain volume d'eau s'accumule dans le basculeur d'un côté, le côté inverse bascule sous le poids, l'eau s'accumule dans un autre basculeur, le même phénomène se répète, et un signal est émis lors du basculement. Permettant l'enregistrement automatique de l'intensité des pluies par heure, il est nécessaire pour l'étude de l'écoulement d'inondation etc..

Comme le montre la Figure 3.2.2, il est souhaitable d'installer le pluviomètre autant que possible à un endroit plat sans obstacles tels que grands arbres aux environs.

Fig. 3.2.2 Emplacement d'installation du pluviomètre (Brassington, 1988)



Il est nécessaire d'installer surtout le pluviomètre à basculeurs sur une base solide, à un endroit plat autant que possible. Le pluviomètre à stockage d'eau devant être lu chaque fois qu'il pleut, la mesure est souvent confiée aux habitants sur place. C'est pourquoi, il est nécessaire de choisir un site d'installation proche d'un hameau où des habitants sont capables de lire et d'écrire. L'observation se fait tous les jours à heure fixe, et généralement le volume des pluies du jour précédent est mesuré à 9 heures du matin. La densité des points d'observation varie selon les objectifs de l'étude et les conditions topographiques, mais il faut au moins un pluviomètre dans la zone d'étude.

A un emplacement prévu pour un barrage, il arrive que le volume des précipitations diffère dans la zone hydrologique de stockage du barrage et le bassin fluvial en amont. Dans ce cas, il est souhaitable de placer des

pluviomètres dans la zone hydrologique de stockage du barrage et le bassin fluvial.

3) Observation du volume évaporé etc.

Les évaporomètres sont de deux type: type réservoir enterré dans le sol et type cuvette au sol. L'OMS a défini comme norme mondiale provisoire une cuvette conique de 122 cm de diamètre, 25 cm de profondeur (US NWS Class A pan), dans laquelle est versée de l'eau pour maintenir un niveau d'eau de 18 à 20 cm, et le taux de diminution du niveau d'eau est mesuré. S'il pleut, le volume indiqué par le pluviomètre est déduit. L'évaporation réelle de la surface du sol dépend de l'état du sol et de la végétation. L'évaporation réelle de la surface d'un lac dépend aussi des conditions climatiques, mais les valeurs d'observation des atmomètres sont de 0,60 à 0,80. L'atmomètre doit être installé à l'horizontale, entouré d'une clôture ou d'un filet métallique pour éviter l'approche de l'eau des oiseaux et autres animaux.

Si des données de température, humidité, vitesse du vent, durée d'ensoleillement, degrés d'ensoleillement etc. sont disponibles, l'évapotranspiration peut être estimée avec la formule de Penman, c'est pourquoi leur observation est aussi souhaitable.

3.2.3 Analyse des résultats d'étude

Les données de précipitations ont été utilisées pour l'analyse de l'écoulement et l'analyse du bilan hydrologique ci-après, et une analyse statistique a été faite pour rechercher les précipitations probables telles que précipitations annuelles, précipitations journalières maximales annuelles etc..

1) Précipitations stochastiques

Par expérience, la répartition normale des précipitations annuelles est connue par expérience, ce qui permet d'obtenir les précipitations annuelles stochastiques. La Figure 3.2.3 montre l'histogramme des précipitations annuelles à Torodi, Niger, incompatibles avec la distribution normale. Le Tableau 3.2.1 montre les précipitations stochastiques obtenues sur cette base.

Fig. 3.2.3 Histogramme des précipitations annuelles à Torodi, Niger (1970 - 1998)

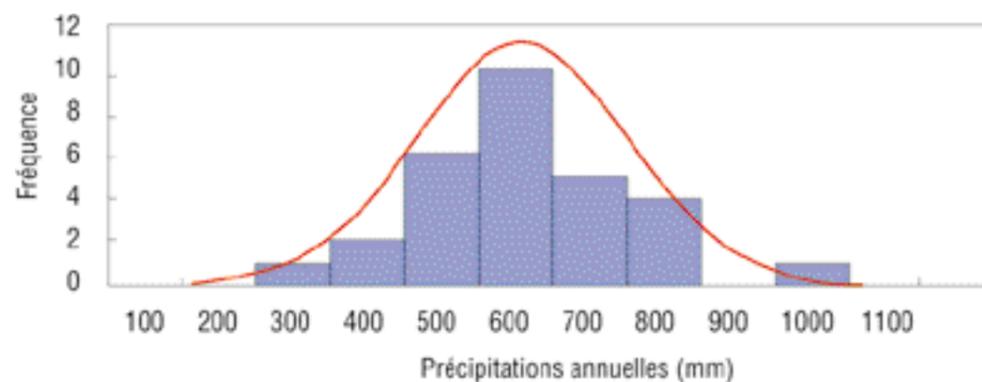


Tableau 3.2.1 Précipitations annuelles stochastiques à Torodi, Niger

Probabilité	1/100	1/50	1/30	1/20	1/10	1/5	1/2
Précipitations probables excessives (mm)	893,6	854,9	823,7	769,9	745,3	682,9	563,4
Précipitations probables non-excessives (mm)	233,2	271,8	303,1	329,9	381,5	443,9	563,4

Par ailleurs, la répartition normale logarithmique des précipitations quotidiennes maximales annuelles est connue par expérience. La Figure 3.2.4 montre l'histogramme des précipitations journalières maximales annuelles dans la ville de Torodi, Niger, et peuvent être considérées comme en répartition normale logarithmique. Le Tableau 3.2.2 indique les précipitations journalières maximales annuelles stochastiques.

Fig. 3.2.4 Histogramme des précipitations journalières maximales annuelles à Torodi, Niger

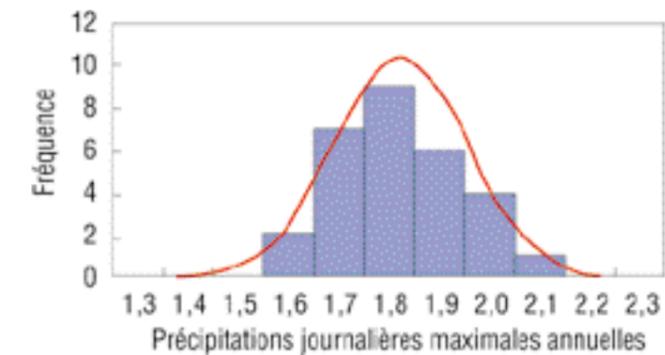


Tableau 3.2.2 Précipitations journalières maximales annuelles à Torodi, Niger

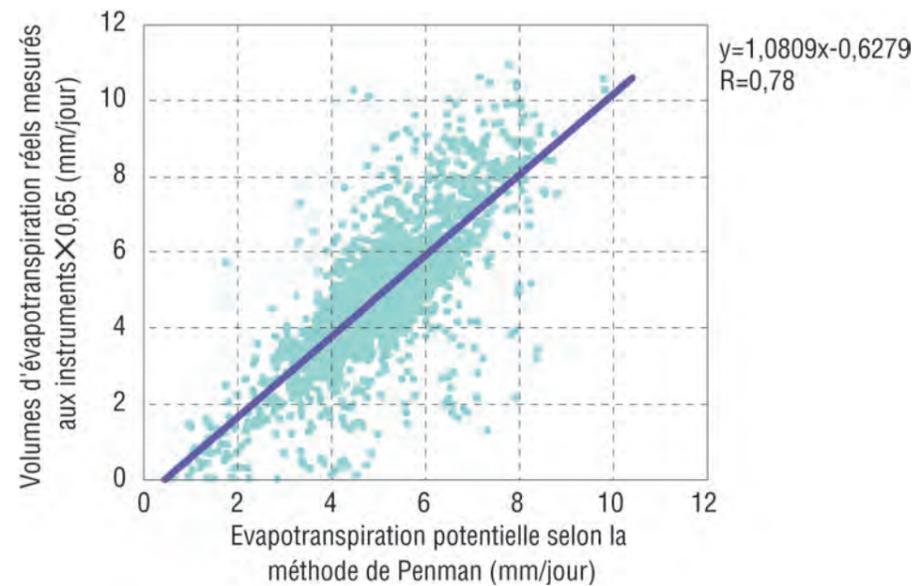
Probabilités excessives	1/100	1/50	1/30	1/20	1/10	1/5	1/2
Méthode normalisée logarithmique	118,8	109,5	102,5	96,9	86,9	76,1	59,2
Méthode Iwai	116,9	108,2	101,6	96,3	86,7	76,3	59,5

Unité: mm/jour

2) Estimation de l'évapotranspiration

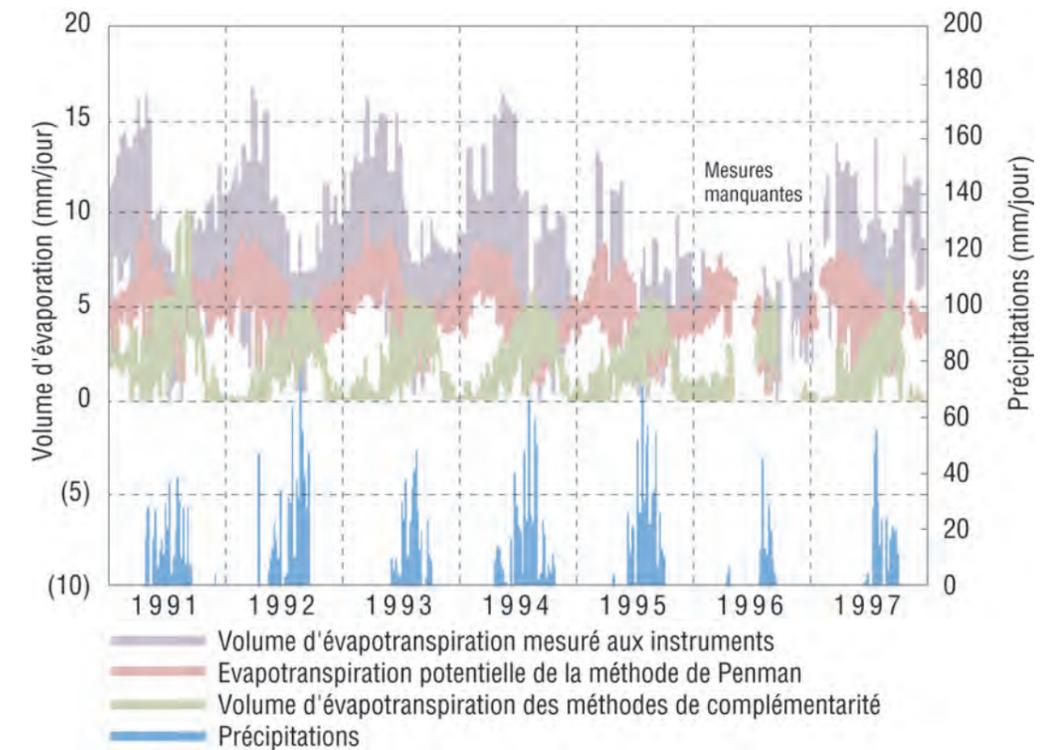
L'évapotranspiration est requise pour l'analyse de l'écoulement et l'analyse du bilan hydrologique, mais sa mesure directe étant difficile, elle est ordinairement estimée à partir de l'évaporation mesurée aux instruments et des données climatiques. Les méthodes d'estimation à partir des données climatiques sont les méthodes de Thornthwait, Penman, Morton, Brutsaert et Stricker etc. La Figure 3.2.5 indique la comparaison entre l'évapotranspiration potentielle obtenue avec la méthode de Penman sur la base des données de pluviométrie, température, humidité, vitesse du vent, heures d'ensoleillement, ensoleillement, et pression atmosphérique, observée à Magou, Niger, et les volumes d'évapotranspiration mesurée aux instruments observés à Magou. Les deux sont pratiquement à 1:1 en multipliant les volumes d'évapotranspiration aux instruments par 0,65.

Fig. 3.2.5 Evapotranspiration potentielle selon la méthode de Penman et volumes d'évapotranspiration mesurés aux instruments à Magou, Niger (1990-1997)



L'évapotranspiration potentielle obtenue avec la méthode de Penman est le volume d'évapotranspiration maximum possible, et non le volume réel. Dans une zone aride comme le Sahel, même si l'évapotranspiration potentielle est élevée, l'eau concernée n'existant pas, la méthode de Penman estime donc exagérément le volume d'évapotranspiration. Pour cela, on fait usage de la méthode de Morton ou de celle de Brutsaert et Stricker qui sont des méthodes par complémentarité. Elles sont ainsi nommées car ce sont des méthodes d'estimation de la quantité d'évapotranspiration basées sur l'idée hypothétique suivante: En période sèche, quand la teneur en humidité baisse et l'évapotranspiration réelle diminue, le niveau d'évapotranspiration potentielle monte, tandis qu'en situation d'humidité, l'évapotranspiration réelle augmente et le niveau de l'évapotranspiration potentielle baisse. Il y a donc une relation de complémentarité entre ces deux phénomènes. Le volume d'évapotranspiration calculé à partir du volume de l'évapotranspiration mesurés aux instruments à Magou, de l'évapotranspiration potentielle selon la méthode de Penman, et de la méthode de complémentarité (méthode de Brutsaert et Stricker) est indiqué sur la Figure 3.2.6. La comparaison de ces valeurs montre que le volume de l'évapotranspiration mesuré aux instruments et l'évapotranspiration potentielle selon la méthode de Penman sont faibles pendant la saison de pluie et élevées pendant la saison sèche, alors que le volume de l'évapotranspiration de la méthode de complémentarité indique la tendance inverse. En considérant l'existence ou non de l'eau à s'évaporer, on peut penser que la valeur estimée de la seconde est proche du volume de l'évapotranspiration réel.

Fig. 3.2.6 Volume d'évapotranspiration mesuré aux instruments de Magou, Niger, évapotranspiration potentielle de la méthode de Penman, volume d'évapotranspiration des méthodes de complémentarité



<Référence>

Méthode de Penman (Glenn et al., 1993)

$$ET_o = \frac{\Delta(Rn-G)}{(\Delta + \gamma)} + \gamma \cdot 6,43 (1,0 + 0,53V_2)(e_s - e_a) / (\Delta + \gamma) / \lambda$$

ET_o = Evapotranspiration potentielle (mm/jour)

Δ = Pente (kPa/°C) de la température T(°C) de la courbe de pression de la vapeur d'eau saturée = 0,20(0,00738T+0,8072)⁻² - 0,000116

T = Température moyenne (°C), γ = Coefficient du psychromètre (kPa/°C) = 0,00163P/λ

P = Pression atmosphérique (kPa) ≅ 101,3 - 0,01055 (EL), EL = Elévation (m)

λ = Chaleur latente de vaporisation (MJ/Kg) = 2,501 - 0,002361T

Rn = Quantité de rayonnement typique (MJ m⁻² jour⁻¹) = (1 - α) Rs - σ Ta⁴ [0,34 - 0,139(e_a)^{0,5}] (0,1 + 0,9n/N)

Rs = Illumination (MJ m⁻² jour⁻¹) ≅ (0,35 + 0,61n/N)Rso

Rso = Illumination moyenne par beau temps (MJ m⁻² jour⁻¹)

α = Albede, σ = Coefficient de Stephan Boltsman = 4,903 x 10⁻⁹ MJ m⁻² jour⁻¹K⁻⁴

Ta = Température absolue (°K) = (T°C + 273)

n/N = Heures d'ensoleillement/heures, G = Volume de chaleur transmis dans le sol (MJ/m²/jour) ≅ 0,

v₂ = Vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol (m/s)

e = Pression de la vapeur d'eau saturée (kPa) à la température T (°C)

= 3,38639 [(0,00738T + 0,8072)⁸ - 0,00019(1,8T + 48) + 0,001316]

e_a = Pression de la vapeur d'eau atmosphérique (kPa) = e_s x Humidité relative moyenne

Méthode de Brutsaert et Stricker (Brutsaert and Stricker, 1979)

E_{ac} (volume d'évapotranspiration réel) = $2E_p$ (volume d'évaporation possible) - E_{pp} (évapotranspiration potentielle de la méthode de Penman),

$$0 \leq E_{ac} \leq E_{pp}$$

$$E_p = 1,26 \Delta R_n / \lambda (\Delta + \gamma)$$

3.3 Etude des eaux de surface

3.3.1 Etat des eaux de surface et objectifs de l'étude

Les eaux de surface observées dans la région du Sahel sont des fleuves, les oueds qui en sont des affluents et des mares. Seules les grandes rivières et lacs/mares ont de l'eau tout au long de l'année; beaucoup des oueds et petites mares ont de l'eau seulement pendant une période définie allant de la saison des pluies à la première moitié de la saison sèche. Le fleuve Niger est un fleuve international qui prend sa source dans les montagnes proches de la frontière entre la Guinée et la Sierra Leone, et se jette dans le Golfe de Guinée au Nigeria. C'est le 3e fleuve d'Afrique, qui arrose 9 pays riverains, a un bassin fluvial de 1,9 million de km² et une longueur totale de 4.200 km.

Les oueds sont des rivières qui ont un écoulement seulement pendant une certaine période de l'année, mais plus le bassin fluvial s'étend, le temps de maintien du niveau d'eau des rivières augmente à cause du retard de l'écoulement. Les grands oueds à bassin large comme la rivière Goroubi qui s'étend du Burkina Faso au Niger, ont un écoulement suivi pendant la saison des pluies. Pour la rivière Goroubi, l'écoulement commence en juin, le niveau d'eau est maintenu élevé d'août au début septembre, et l'écoulement s'arrête au début octobre. Pour les oueds à bassin étroit, l'écoulement est sensible aux précipitations, et s'arrête quelques heures à un jour environ après la saison des pluies.

Il y a un lac de grande dimension, le lac Tchad, qui se situe à la croisée de quatre pays : sous l'effet des sécheresses de ces dernières années, sa surface continue à diminuer, ce qui a un fort impact sur l'utilisation de l'eau et la pêche.

Des mares se forment par endroits dans des cuvettes, d'anciennes carrières d'argile et sur les terres basses aux environs des rivières. De plus, des barrages d'endiguement des oueds ont été bâtis par endroit, dont l'eau sert de source d'eau. En particulier, un grand nombre de barrages de grande dimension à réservoir de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers de km² sont bâtis, dont l'eau est utilisée comme eau potable, eau industrielle, eau d'irrigation, eau pour la pisciculture etc.. Les barrages et mares de petites dimensions sont inondés avec le commencement de la saison, mais beaucoup sont taris pendant la saison sèche.

L'étude des eaux de surface sera réalisée afin de saisir la période d'écoulement des rivières et lacs/mares, leur volume d'eau et la forme de leur écoulement. L'étude des rivières, en particulier, aura pour objectif de saisir la forme des rivières concernées et l'état de leur écoulement; les données d'étude seront utilisées pour l'analyse des écoulements et l'analyse du bilan hydrologique, mais aussi directement pour la conception d'ouvrages sur les cours d'eau tels que les barrages.

3.3.2 Méthode de l'étude

1) Etude topographique

La carte topographique est nécessaire non seulement l'étude des eaux de surface, mais pour toutes les études. Une carte topographique au 1:50.000 est souhaitable, mais il arrive souvent que les cartes à cette échelle existent seulement pour les environs de la capitale dans les pays du Sahel. Les cartes au 1:200.000 sont ordinaires dans cette zone, et elles serviront donc de carte de base topographique. Mais les photos aériennes au 1:50.000 couvrent pratiquement toute la zone, et pourront donc être utilisées pour remplacer les cartes. On ne peut pas espérer une précision satisfaisante en particulier pour l'élévation, mais les cartes à petite échelle existantes et les photos aériennes permettront l'établissement d'une carte au 1:50.000, qui pourra servir de carte de base pour l'étude. Les images satellite permettent aussi de connaître l'état du relief.

La définition des sites d'étude est généralement difficile pour une zone au relief plat comme celle de l'étude. L'emploi de petits appareils de GPS portables permettant de définir longitude et latitude par satellite s'avère pratique dans ce cas, mais dans certains cas la définition est difficile sur une carte à grande échelle à cause des erreurs.

Ces cartes et photos aériennes et images de satellite permettront d'interpréter la forme des rivières et lacs/mares et le relief de leurs environs, et de saisir l'état de développement des rivières. La télédétection et l'étude sur place mettront au clair les détails comme la végétation, l'utilisation des sols, l'état des plaines d'inondation etc. Les informations à déchiffrer à partir du relief sont les limites du bassin, la densité des vallées, la forme des chenaux et anciens chenaux, l'extension de la plaine d'inondation, les talus naturels, l'existence de rétrécissements etc. pour les rivières. La saisie de la portée de collecte d'eau et d'inondation des lacs/mares, et la relation entre le niveau d'eau et le volume de stockage etc. est nécessaire pour les lacs/mares et barrages.

La Figure 3.3.1 indique un exemple d'image satellite des environs de la ville de Ségou au Mali.

Fig. 3.3.1 Exemple d'image satellite des environs de la ville de Ségou au Mali

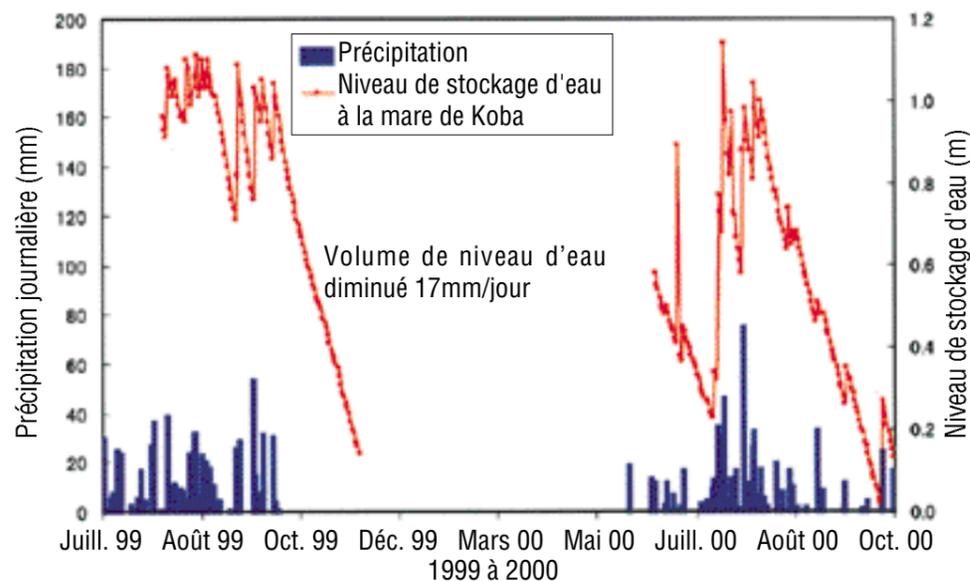


2) Observation du niveau d'eau

Après saisie de l'état du relief ci-dessus, des points d'observation du niveau d'eau seront sélectionnés sur les rivières, lacs/mars. Pour la sélection, il faudra prendre en compte des emplacements faciles d'accès, des points où il sera possible de mesurer de manière cohérente du niveau d'eau minimal au niveau d'eau maximal, des points où l'observation de longue durée sera possible etc.. Pour les rivières, il est souhaitable d'éviter les courbes dues aux méandres pour éviter l'accumulation de sable et l'érosion, et de choisir un site sur une section en ligne droite à flux sable. Il faudra aussi éviter les emplacements à proximité des confluent pour ne pas subir l'influence des autres rivières.

L'observation du niveau d'eau peut se faire par lecture périodique d'un indicateur de niveau, ou bien par enregistrement automatique par un niveau d'eau enregistreur. Le niveau d'eau est la méthode la plus simple et la plus sûre, et suffira pour une grande rivière à écoulement stable comme le fleuve Niger. Mais un niveau d'eau enregistreur devra être installé pour les rivières à écoulement faible, à changement de niveau d'eau important à chaque saison des pluies. Mais même en cas d'installation d'un niveau d'eau enregistreur, l'indicateur de niveau servira de référence, c'est pourquoi les deux devront être combinés, et il faudra périodiquement contrôler les enregistrements du niveau d'eau enregistreur (par exemple papier d'enregistrement, remplacement des piles). Pour les niveaux d'eau enregistreurs utilisant un crayon, il faudra faire attention à l'assèchement de la pointe du crayon. La Figure 3.3.2 indique les résultats des observations de niveau d'eau de la mare de Koba au Mali. Dans le cas de lacs et de barrages, le volume de l'évapotranspiration estimé et le taux de baisse du niveau d'eau permettent aussi d'estimer l'infiltration dans le sol de l'eau stockée.

Fig. 3.3.2 Résultats des observations de niveau d'eau à la mare de Koba, Mali

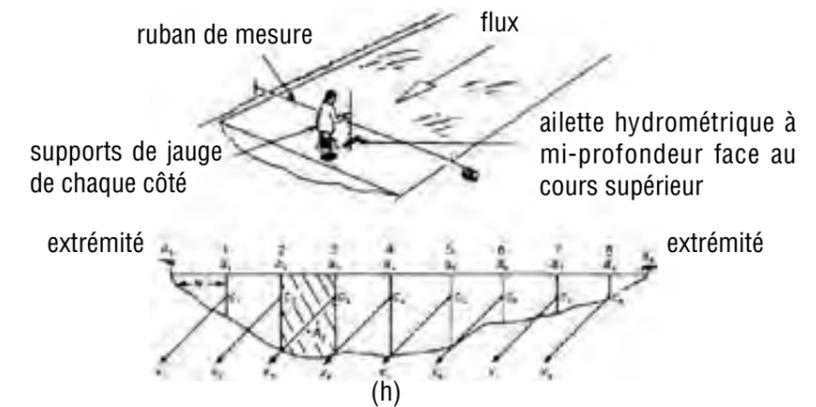


3) Observation du débit

La mesure de la vitesse du flux et la mesure transversale de la rivière permettent d'obtenir une formule relationnelle (courbe de niveau d'eau - débit) par conversion du niveau d'eau en débit. Les données de niveau d'eau observé et la courbe de niveau d'eau - débit permettent de calculer le débit de la rivière. La mesure de la

vitesse du flux s'effectue par ailette hydrométrique à hélice ou bouées. La vitesse du flux d'une rivière n'est pas uniforme, il y a des différences selon la profondeur et la rive droite ou gauche. Pour la profondeur, en cas de faible profondeur, la vitesse du flux moyenne est donc considérée en mesurant la vitesse du flux à 60% de la profondeur d'eau; et en cas de grande profondeur, la mesure est faite à 20% et 80% de la profondeur, et la vitesse du flux moyenne sera la moyenne de ces valeurs. Pour la rive droite et gauche, la coupe de la rivière sera divisée en plusieurs sections, les mesures sont faites pour chaque section et totalisées. (Fig. 3.3.3)

Fig. 3.3.3 Modèle de mesure du débit (Brassington, 1988)



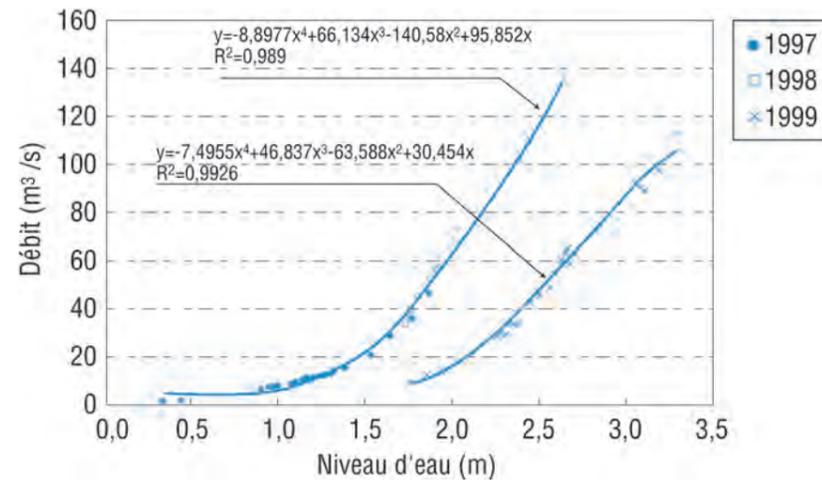
La mesure de la vitesse du flux par ailette hydrométrique étant difficile en cas de vitesse rapide, par exemple au moment de l'inondation; des bouées sont alors introduites, pour obtenir la vitesse du flux par mesure du temps de descente sur une section préalablement mesurée. Dans ce cas, il est nécessaire de convertir les valeurs mesurées en vitesse de flux moyenne par multiplication par un coefficient (0,85 environ), et une certaine erreur est inévitable. Il est possible d'utiliser des fruits, de oranges par exemple, qui ont un poids adapté et sont visibles de loin, à la place des bouées. Il sera aussi facile de les récupérer.

Pour améliorer la précision de la courbe de niveau d'eau - débit, il est aussi essentiel d'augmenter le nombre d'observations, et de faire des observations aussi précises que possible des grands débits au moment de l'inondation etc.. La Figure 3.3.4 donne un exemple de courbe de niveau d'eau - débit de rivière Goroubi au point de Torodi.

Si le débit est faible, il est possible d'obstruer la rivière avec une digue triangulaire ou rectangulaire et d'obtenir le débit en calculant la profondeur du seuil. Le débit maximal mesurable est d'environ 70 l/s avec une digue triangulaire à ouverture de 90°, et d'environ 470 l/s avec une digue rectangulaire de 1,6 m de largeur. Il faudra se référer à des ouvrages de référence hydrologiques pour les formules et les tableaux mathématiques de recherche du débit à partir de la profondeur du seuil.

Pour observer le niveau d'eau et le débit, il est souhaitable d'éviter des emplacements où la forme de la coupe de rivière change à cause de l'accumulation de sable et de l'érosion. S'il est impossible d'éviter de tels endroits, il faut augmenter le nombre d'observations, et renouveler en continu la courbe de niveau d'eau - débit.

Fig. 3.3.4 Courbe de niveau d'eau/débit de la rivière Goroubi à Torodi



4) Analyse de la qualité de l'eau

L'étude de la qualité de l'eau est faite pour confirmer que la qualité de l'eau est adaptée aux applications. La mesure de la température, pH, conductivité électrique etc. est effectuée sur place par indicateur portable. Des échantillons d'eau sont prélevés afin de confier l'analyse concernant les principaux ions, l'azote, les matières organiques, les bactéries etc. à un organisme d'analyse. Il existe depuis peu une méthode d'analyse de l'eau simple par exemple le pack-test, qui permet l'analyse immédiate sur place avec tube rempli de réactif.

Les principales rubriques d'analyse sont généralement: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Fe , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , TDS, pH, EC, bactéries ordinaires et colibacilles.

S'il y a des mines ou usines dans le bassin, il faudra ajouter des rubriques comme métaux lourds, qui sont à considérer. Les valeurs d'analyse devront être comparées aux indications pour l'eau potable de l'OMS < Organisation Mondiale de la Santé > (Tableau 3.3.1) et aux critères de qualité d'eau des eaux d'irrigation USDA < United States Department of Agriculture > (Figure 3.3.5) pour juger de l'adaptation de l'eau.

La conductivité électrique est la valeur inverse de la résistance électrique (résistivité), et sa valeur augmente avec la teneur totale en chlorures dissous. La conductivité électrique, qui se mesure facilement, peut être considérée comme un indice représentatif de la qualité d'eau. Une eau à conductivité électrique élevée, à teneur totale en chlorures dissous élevée, est souvent inadaptée à l'utilisation comme eau potable et eau pour l'irrigation.

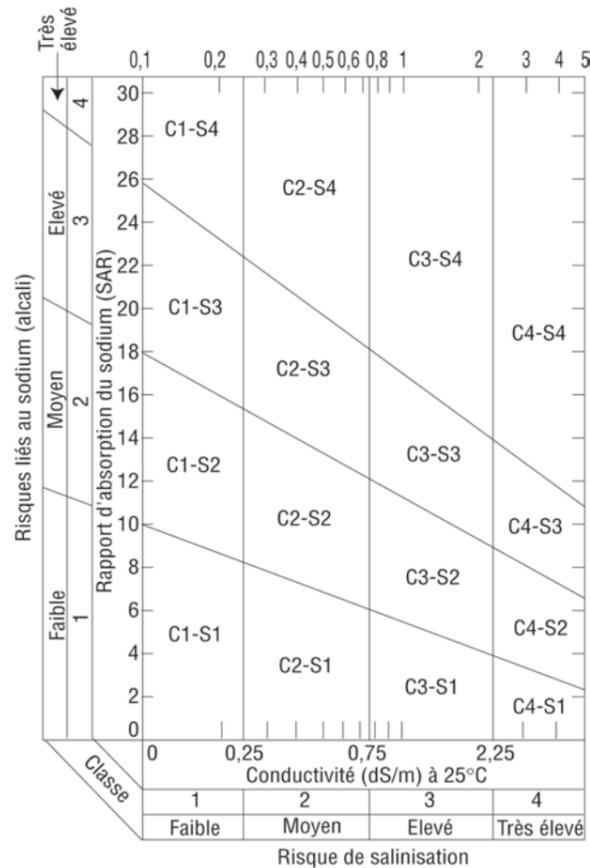
Tableau 3.3.1 Indications pour l'eau potable de l'OMS (extrait)

Rubriques	Niveau d'indications
Sb	0,005 mg/litre
As	0,01 mg/litre
Ba	0,7 mg/litre
B	0,5 mg/litre
Cd	0,003 mg/litre
NH ₂ Cl	3 mg/litre
Cl	5 mg/litre
Cr	0,05 mg/litre
Cu	2 mg/litre
CN	0,07 mg/litre
F	1,5 mg/litre
Pb	0,01 mg/litre
Mn	0,5 mg/litre
Hg	0,001 mg/litre
Mo	0,07 mg/litre
Ni	0,02 mg/litre
NO ₃ ⁻	50 mg/litre
NO ₂ ⁻	0,2 mg/litre
Se	0,01 mg/litre
U	0,002 mg/litre
Coliforme E. ou bactérie coliforme thermotolérant	Ne doivent pas être détectés dans les échantillons de 100 ml
Activité alpha brute	0.1 Bq/litre
Activité beta brute	1 Bq/litre

Fig. 3.3.5 Critères de l'eau pour l'irrigation (USDA, 1954)

$$SAR = Na^+ / \sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2}$$

- C1: Utilisable pour pratiquement toutes les cultures et sols
- C2: Utilisable sur les sols où un lessivage convenable s'effectue. Utilisable pour les cultures moyennement résistantes au sel.
- C3: Inutilisable sur les sols à mauvaise évacuation d'eau. Utilisable pour les cultures très résistantes au sel, si une évacuation d'eau convenable est possible.
- C4: Inutilisable pour l'irrigation ordinaire. Des mesures spéciales sont requises pour les dégâts dus au sel.
- S1: Utilisable sur pratiquement tous les sols
- S2: Des dégâts dus au sodium évidents apparaissent sur les sols à grains fins, et capacité d'échange ionique élevée.
- S3: Des dégâts dus au sodium apparaissent pratiquement sur tous les sols. Un traitement spécial du sol, le lessivage et l'augmentation des matières organiques sont requis.
- S4: Inadapté à l'irrigation.



3.3.3 Analyse des résultats d'étude

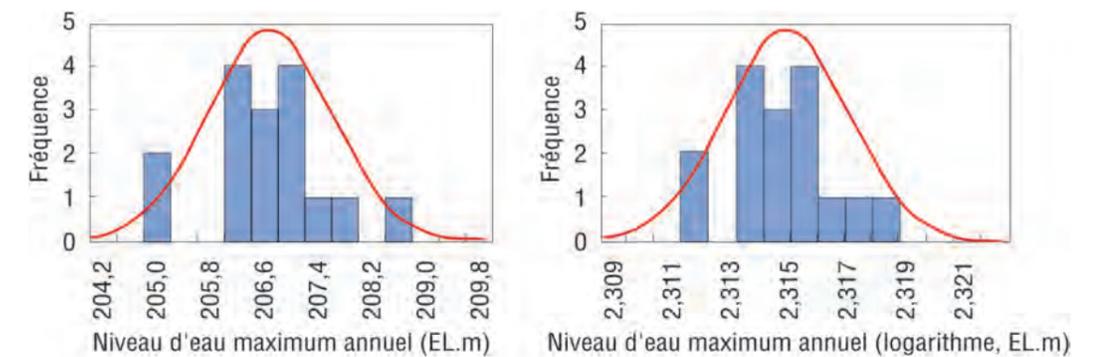
Pour l'analyse des eaux de rivière, le débit est recherché sur la base du niveau d'eau observé. Ce calcul permet d'apprécier l'écoulement sur une période donnée. L'analyse de la relation entre les précipitations et le débit permet d'obtenir le volume d'écoulement et le taux d'écoulement par rapport aux précipitations. Ces résultats d'analyse sont des informations nécessaires pour la planification d'ouvrages hydrauliques sur les rivières, par

exemple les barrages.

1) Calcul du niveau d'eau probable

Comme les précipitations, le niveau d'eau des rivières peut faire l'objet d'un traitement statistique. Par exemple, on sait par expérience que le volume d'eau maximum au moment de l'inondation est en répartition normale logarithmique. La Figure 3.3.6 montre l'histogramme du niveau d'eau maximum annuel de la rivière Goroubi établi dans le passé pour étudier la hauteur adaptée d'un petit barrage pour permettre la culture pendant la saison des pluies dans la ferme pilote de Magou, Niger. La forme de l'histogramme a permis de juger de l'adaptation de la répartition normale logarithmique, plutôt que de la répartition normale, et d'estimer le niveau d'eau maximum annuel à probabilité 1/2 de la rivière Goroubi à 206,9 m à Magou.

Fig. 3.3.6 Histogramme du niveau d'eau maximum annuel sur la rivière Goroubi à Magou, Niger



2) Analyse de l'écoulement

L'écoulement des rivières varie en fonctions d'éléments tels que surface du bassin, quantité des précipitations, conditions de l'utilisation des sols etc.

Le Tableau 3.3.2 donne le cas de la rivière Goroubi, un oued à écoulement seulement pendant la saison des pluies, pour la relation entre la surface du bassin et l'écoulement.

Tableau 3.3.2 Catégories selon la surface du bassin et écoulement fluvial dans le bassin de la rivière Goroubi

Surface du bassin	Etat de l'écoulement
Approximativement inf. à 100 km ²	Il n'y a pas d'écoulement permanent, une inondation de courte durée a lieu en fonction des précipitations.
Approximativement inf. 100 – 1.000 km ²	Il n'y a pas d'écoulement permanent, mais un écoulement de courte durée en fonction des précipitations.
Plus de 1.000 km ² .	Écoulement quasi permanent pendant la saison des pluies

L'analyse de la relation entre les précipitations et l'écoulement de la rivière est essentielle pour le calcul du volume et du taux d'écoulement. Dans le cas de la rivière Goroubi, affluent à bassin de moins de 200 km², s'il pleut, l'écoulement de la rivière commence une à plusieurs heures plus tard, et s'arrête environ dans la journée. Vu cet écoulement d'inondation correspondant à une chute de pluies, et en supposant des précipitations

uniformes de courte durée sur tout le bassin, un taux d'écoulement de 15 - 31% a été obtenu par analyse par la méthode de recherche des traces d'inondation. Par ailleurs, la méthode simple taux d'écoulement = volume d'écoulement de la rivière ÷ (volume des précipitations × surface du bassin hydrologique) appliquée à un bassin similaire a permis d'obtenir 12 - 18%. Et la méthode ORSTOM (Rodier et Auvray, 1965) souvent utilisée pour l'analyse de l'écoulement indique un taux d'écoulement de 28% pour une inondation à probabilité décennale sur un bassin hydrologique de 120 km². Pour le modèle de réservoir, le taux d'écoulement est estimé à environ 5% comme indiqué plus loin.

Ces différences de taux d'écoulement selon les méthodes de calcul rendent difficile une estimation précise. Comme l'état d'utilisation des sols dans le bassin, le relief, la géologie, la nature du sol, le motif des précipitations etc. exercent une influence, il est nécessaire de choisir la méthode de calcul pour le taux d'écoulement en fonction de l'importance des installations prévues.

En cas de planification de la construction d'un ouvrage fluvial tel que barrage, des documents sur les débits de la rivière sont nécessaires, mais en dehors des grandes rivières, ils sont pratiquement inexistant pour les oueds affluents. Les données pluviométriques sont toutefois plus disponibles que celles sur les débits. La méthode d'analyse de l'écoulement qui permet l'estimation du débit à partir des données pluviométriques est alors utilisable. Autrement dit, un modèle d'écoulement peut être établi à partir des données pluviométriques et du débit classés dans les documents d'observation, et le débit antérieur estimé en y introduisant les précipitations antérieures. Il est ainsi possible de définir l'écoulement d'inondation de conception du barrage en recherchant statistiquement l'écoulement stochastique sur cette base.

Il existe diverses méthodes d'analyse de l'écoulement, nous présenteront ici la méthode avec modèle à réservoirs utilisée pour l'analyse de la rivière Mago, affluent de la rivière Goroubi. Le modèle à réservoirs consiste à modéliser le bassin sous la forme d'un réservoir troué. Les pluies pénètrent par la partie supérieure du réservoir et s'écoulent par les trous. Le volume d'écoulement est proportionnel à la hauteur entre les trous et la surface, et l'indice des trous. C'est un modèle qui indique la pénétration par l'orifice inférieur, et le mouvement latéral de l'écoulement vers le chenal etc. par les trous latéraux. La Figure 3.3.7 montre la structure et les paramètres du modèle à réservoirs utilisé pour l'analyse. Dans ce modèle, le réservoir pour la structure teneur en eau du sol est placé à gauche du réservoir supérieur. De plus, une particularité est que l'orifice de pénétration du réservoir supérieur est en saillie par rapport au fond. La Figure 3.3.8 indique les débits calculés reproduits à partir de ce modèle et les débits mesurés.

Fig. 3.3.7 Structure du modèle à réservoirs de la rivière Mago, Niger

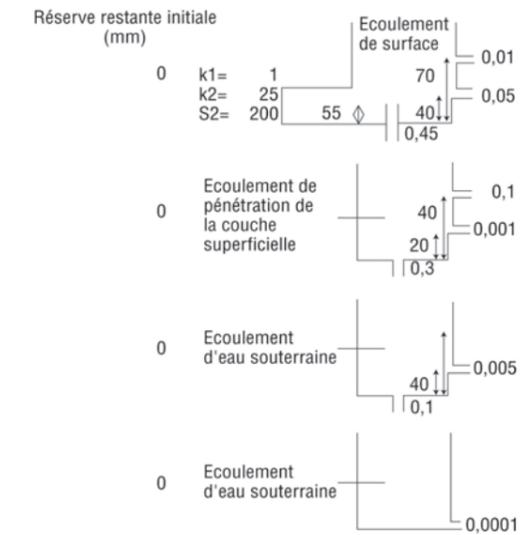
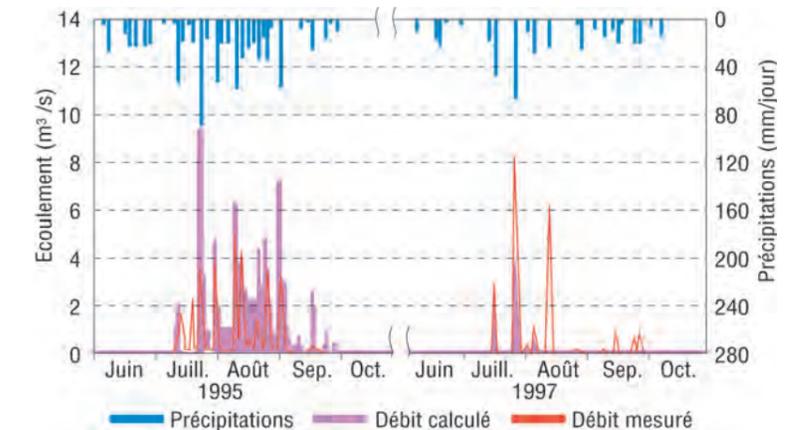


Fig. 3.3.8 Débit calculé avec le modèle à réservoirs et débit mesuré (1995, 1997)



3) Analyse du bilan hydrologique

Le modèle à réservoirs mentionné ci-dessus permet d'estimer le bilan hydraulique dans le bassin. Dans l'analyse du modèle à réservoirs pour le bassin de la rivière Goroubi, l'évapotranspiration a été estimée à 66%, l'écoulement de la rivière à 5%, l'écoulement d'eau souterraine à 29% environ par rapport aux précipitations.

Le modèle à réservoirs permet aussi d'estimer le niveau d'eau souterraine. Avec un modèle à réservoirs comme celui de la Figure 3.3.7 ci-avant, il est possible d'estimer le niveau des eaux souterraines à partir de la profondeur d'eau dans les réservoirs 3 et 4 inférieurs. Si l'observation du niveau des eaux souterraines est effectuée dans la zone d'étude, il sera possible de vérifier la précision du modèle à réservoirs en utilisant ces données.

Pour un barrage et mare, il est possible de reproduire et de prévoir l'état de stockage par modèle du bilan hydrologique simple. La Figure 3.3.9 indique un exemple de modèle indiquant l'état d'accumulation du barrage de Torodi. La Figure 3.2.10 indique les résultats du calcul de la variation du niveau de stockage d'eau en utilisant ce modèle.

La mise au clair du bilan hydrologique dans le bassin concerné permet d'estimer le volume d'eau de surface utilisable et la recharge des eaux souterraines.

Fig. 3.3.9 Modèle de stockage du barrage de Torodi

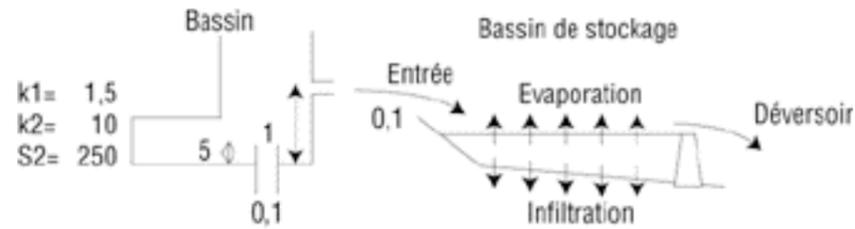
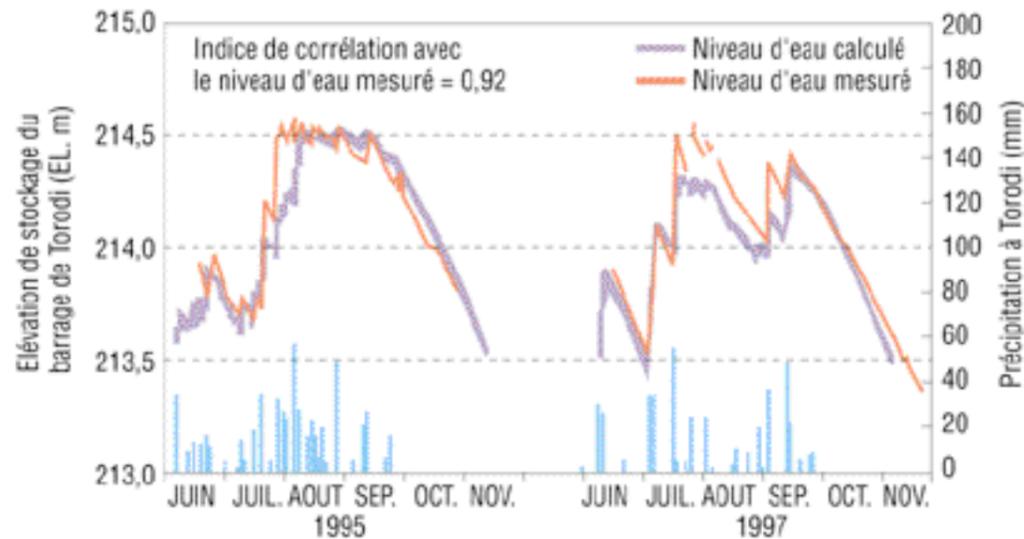


Fig. 3.3.10 Résultats du calcul du stockage du barrage de Torodi



3.4 Etude des eaux souterraines

3.4.1 Etat actuel des eaux souterraines et objectifs de l'étude

Les eaux souterraines peuvent approximativement se diviser en eaux en couche (eaux d'espace) et eaux de fissure (eaux de fracture) par leur type de réserve.

Les eaux en couche remplissent l'espace dans la couche aquifères telle que couche sédimentaire, etc. et sont distribuées en couches. Le volume de réserve dépend de l'épaisseur et de l'étendue de la couche aquifère. La circulation des eaux en couche de la couche sédimentaire distribuée dans la plaine d'inondation des oueds est importante, la réserve d'eau est importante, ce qui les fait considérer comme une source d'eau essentielle. La couche aquifère est épaisse, et en cas de recharge d'eaux souterraines abondantes par l'oued etc., il est possible de pomper plusieurs centaines de m³/jour à un puits.

Par ailleurs, les eaux des fissures sont des eaux souterraines existant dans les fissures du socle et de zone de broyage de faille. Le volume d'eau exploitable par puits des eaux de fissures est relativement faible, comparé à

celui des eaux en couche.

Dans le Sahel, outre la recharge directe des eaux souterraines par les précipitations, celle à partir des eaux de surface telles que rivières et mares, est importante. C'est pourquoi, plus on s'éloigne des rivières et mares, source de recharge des eaux souterraines, plus le niveau des eaux souterraines a tendance à être profond. Dans les puits proches des oueds, le niveau d'eau souterraine est proche du niveau d'eau de la rivière pendant la saison des pluies, et baisse parfois de 10 m pendant la saison sèche. De plus, dans les puits éloignés de la source de recharge en eaux souterraines, la variation du niveau des eaux souterraines est faible, à environ 30 m au-dessous de la surface. Pour l'utilisation durable des eaux souterraines circulantes, il est nécessaire de saisir la répartition des sources de recharge des eaux souterraines et le volume de recharge. La construction de nouveaux petits barrages, ou l'augmentation de la capacité de stockage par aménagement de mare, sont des méthodes efficaces pour l'augmentation du volume de recharge des eaux souterraines.

L'étude de l'état actuel des eaux souterraines, qui permet de connaître la forme de réserve d'eau et les particularités de la couche aquifère, est réalisée pour étudier les méthodes de pompage les mieux adaptées et établir un plan d'utilisation approprié. Dans l'étude actuelle, la saisie des conditions topographiques et géologiques et la mise au clair de la répartition des couches aquifères qui sont l'enveloppe des eaux souterraines sont d'abord nécessaires. Pour l'exploitation des eaux de fissures, il faut saisir la faille et la structure plissée, et saisir les emplacement des fissures du socle et des zones broyées. L'interprétation des photos aériennes, la reconnaissance sur le terrain, la prospection géophysique etc. sont des méthodes utilisées pour ces études topographiques et géologiques.

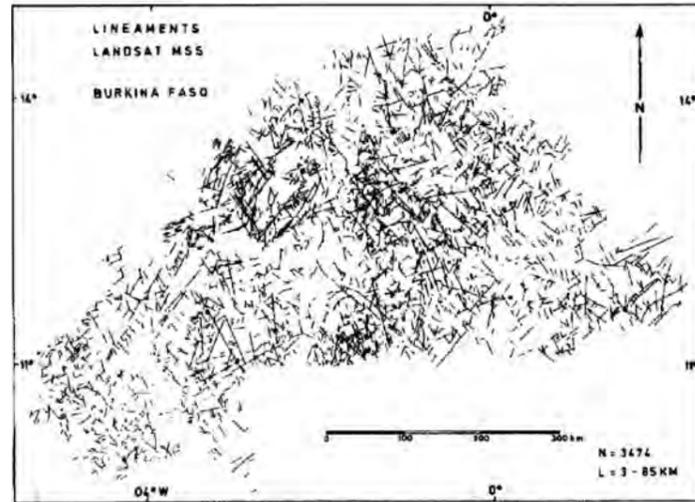
Par ailleurs, l'observation du niveau d'eau souterraine, les essais de forage/pompage de puits sont réalisés pour la mise au clair des particularités des couches aquifères et des systèmes circulants des eaux souterraines, et la recherche du volume exploitable. L'eau souterraine est souvent utilisée comme eau potable. Dans ce cas, il est essentiel d'assurer des eaux souterraines de bonne qualité. Il est nécessaire dans ce cas d'analyser la qualité de l'eau pour vérifier qu'elle est adaptée aux objectifs prévus.

3.4.2 Méthode d'étude

1) Etude topographique

Une étude topographique est réalisée pour saisir les conditions hydrologiques et géologiques de la zone concernée. Des cartes topographiques, photos aériennes, images de satellite etc. sont utilisées pour cette étude. Ces photos aériennes et images satellite permettent d'obtenir des informations détaillées qui peuvent être omises sur une carte topographique. Les photos aériennes étant en perspective, elles permettent d'interpréter les détails des ondulations du relief, l'état d'utilisation des sols, la végétation, les structures géologiques etc.. L'interprétation des photos aériennes et images satellite pour la saisie des emplacements de linéament est surtout efficace pour sélectionner les emplacements de puits visant à capter les eaux de fissure dans le socle. Le linéament est une structure linéaire sur laquelle les points de relief discontinu sont placés en ligne droite, qui reflète souvent les failles et fractures incluant beaucoup d'eaux de fissure. La Figure 3.4.1 est la carte d'interprétation du linéament du Burkina Faso. La sélection des zones de longueur d'ondes dans l'analyse des images des satellites LANDSAT, SPOT etc. permet d'obtenir des informations telles que végétation, utilisation des sols, distribution des eaux de surface, nature de la couche superficielle, structure géologique etc..

Fig. 3.4.1 Interprétation du linéament de tout le Burkina Faso (Bannert et al., 1980)



2) Etude géologique

Les eaux souterraines existent dans l'espace entre des couches ou des fractures de roches. Il est donc essentiel de saisir la distribution des structures géologiques pouvant former des couches aquifères dans l'étude des eaux souterraines. Si une carte géologique indiquant l'extension des roches et couches et les structures existe, il est possible de saisir l'état de distribution des couches susceptibles de contenir des eaux souterraines.

Le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) possède d'abondantes données géologiques sur le Sahel, et publie et vend un grand nombre de cartes géologiques et rapports d'études liées à la géologie et de guides sur différentes méthodes d'étude. (BRGM, 1960 etc.)

La prospection géologique permet de saisir plus en détail les conditions topographiques et géologiques. La prospection s'intéresse à la situation topographique, à l'état des couches et roches à escarpements exposés, aux emplacements de résurgences, etc. et permet de saisir la distribution des couches et roches incluant des eaux souterraines et l'état des espaces. De plus, l'analyse granulométrique des échantillons de roches exposées prélevés permet de connaître l'indice d'infiltration approximatif.

3) Etude des puits actuels

Le répertoire des puits indique l'emplacement (longitude et latitude), la structure, la profondeur du puits, la profondeur de l'eau souterraine, le volume puisable, la nature de la couche aquifère etc. de chaque puits, et une base de données des puits est établie dans beaucoup de pays. C'est un document encore plus efficace combiné avec les cartes géologiques. Mais n'étant pas exhaustif, il doit être complété via une étude sur place. L'enregistrement du diagramme des couches étant disponible par les puits, il est souhaitable de s'en procurer le plus possible.

L'étude sur place a pour objectif la saisie du niveau d'eau souterraine, de la profondeur, du diamètre du trou, le volume de l'eau pompée par rapport au socle, le type de puits, la méthode de pompage, le relief aux environs du site (plaine d'inondation, inclinaison de la plaine d'inondation, plateaux etc.) pour les puits existants. Et l'enquête par interview auprès des habitants a permis de noter les principales utilisations, le volume approximatif

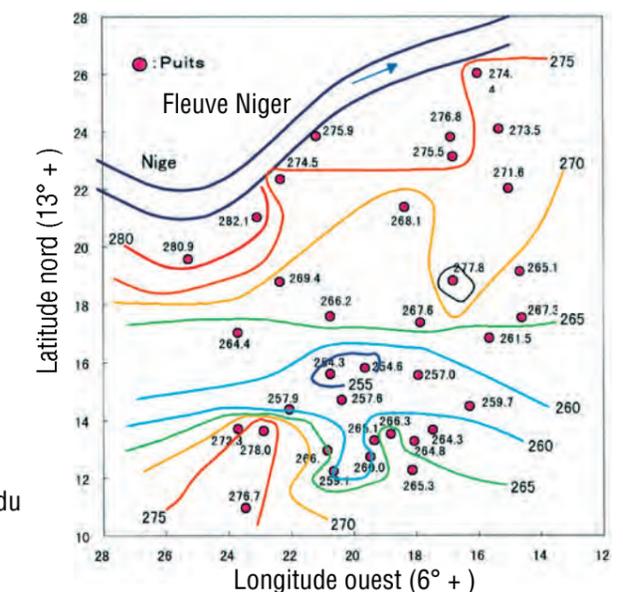
pompé par jour, la période d'installation, l'historique des réparations telles que surcreusement etc.. La longitude et la latitude mesurées par les équipements GPS etc., l'élévation du socle, la profondeur de la section crépine etc. sont aussi indiqués si connus. Pour les résultats de l'étude, le croquis des environs du puits, le dessin indiquant clairement le point de contrôle de mesure du niveau d'eau, et les photos sont classés ensemble. Sur les puits où la paroi est visible, il est possible d'observer les couches avec une lampe de poche etc.. Si possible, des essais de pompage peuvent être effectués pour calculer la constante hydrologique comme l'indice d'infiltration ou de stockage etc. de la couche aquifère.

4) Observation simultanée du niveau des eaux souterraines

Si le niveau d'eau de nombreux puits est vérifié dans la période courte (quelques jours) et indiqué sur la carte topographique, cela permet de mettre au clair la forme des eaux souterraines de la zone concernée. Si l'élévation du socle des puits est recherché par nivellement topographique, il sera possible de tracer l'hypsogramme de niveau des eaux souterraines. L'eau souterraine s'écoulant directement dans le sens des courbes de niveau, l'hypsogramme permet de connaître l'orientation d'écoulement des eaux souterraines. Si la zone concernée est étendue et les puits nombreux, comme le nivellement topographique exige du temps et est onéreux, l'altitude peut être obtenue par altimètre de type pression atmosphérique (erreur de 10 m environ) ou à partir des cartes topographiques existantes. Bien que la précision baisse avec ces méthodes, elles permettent de connaître les tendances générales. La Figure 3.4.2 est un hypsogramme de niveau des eaux souterraines dans la zone Sud de Ségou, Mali. Sur cet hypsogramme, la partie centrale est la partie à l'altitude la plus basse, moins de 255 m, ce qui laisse supposer que les eaux souterraines sont rechargées par le fleuve Niger au Nord et la rivière Bani qui s'écoule au Sud de la carte.

Les courbes de niveau des eaux souterraines permettent d'obtenir des informations abrégées sur l'orientation du flux des eaux souterraines, et la perméabilité de la couche aquifère. Autrement dit, la perméabilité est faible dans les zones à courbes de niveau resserrées et forte dans celles où elles sont larges. Par conséquent, les zones à courbes de niveaux larges conviennent mieux pour l'installation de nouveaux puits, de plus, il est souhaitable de sélectionner des points vers lesquels convergent les flux des eaux souterraines.

Fig. 3.4.2 Hypsogramme de niveau des eaux souterraines dans la partie Sud de Ségou, Mali (Octobre 1998)

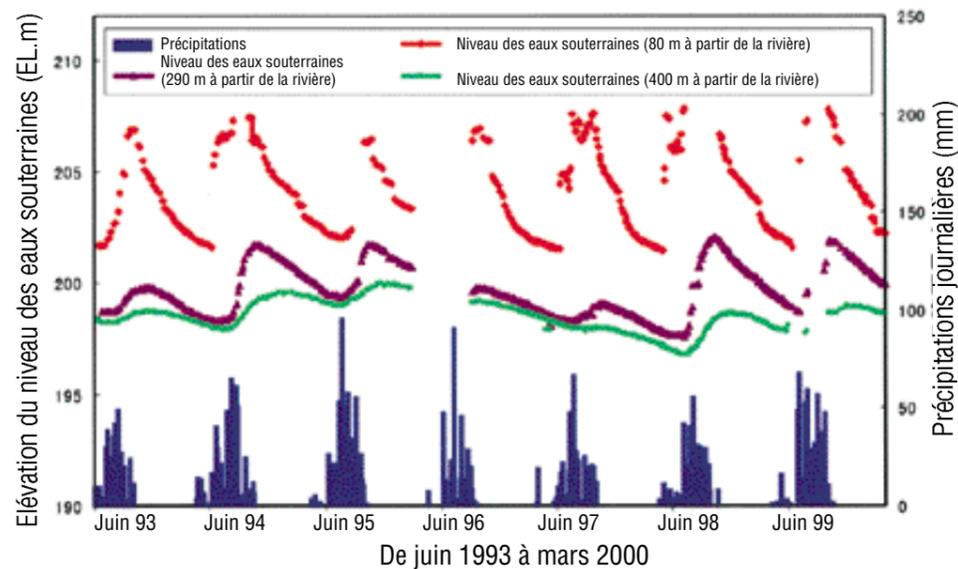


(Les chiffres figurent l'élévation du niveau des eaux souterraines)

5) Observation continue du niveau des eaux souterraines

L'observation continue du niveau des eaux souterraines est faite pour connaître les variations saisonnières du niveau des eaux souterraines et la tendance de l'évolution au fil du temps. En général, le niveau des eaux souterraines non pressurisées augmente pendant la saison des pluies, et baisse pendant la saison sèche, mais l'ampleur de la variation de niveau annuelle et la période de variation dépendent de la couche aquifère. Par conséquent, il faut mettre au clair le niveau d'eau souterraine de quelle couche aquifère doit être mesuré. Si un puits existant est utilisé, l'influence du puisage humain est possible, c'est pourquoi il est souhaitable si possible de creuser un nouveau trou d'observation réservé. La mesure peut être faite sur place par une personne équipée d'un indicateur de niveau portable, ou bien par un indicateur enregistreur installé sur le puits. L'intervalle de mesure doit être au moins d'une fois par semaine, et être poursuivi plus d'un an. Les indicateurs de niveau d'eau sont généralement à électrodes, et il est possible de fabriquer soi-même le cordon et la bande pour la mesure. Si le niveau d'eau souterraine est peu profond, un ruban en acier enduit de craie pourra être utilisé. L'élévation du socle est obtenue par mesure du nivellement topographique, et la mesure de la hauteur jusqu'au point de contrôle (trou) de mesure du niveau est aussi souhaitable. La Figure 3.4.3 donne l'exemple des relevés d'observation du niveau des eaux souterraines dans la ferme pilote à Magou, Niger.

Fig. 3.4.3 Relevés d'observation du niveau des eaux souterraines dans la ferme pilote à Magou, Niger



6) Prospection électrique

En prospection électrique, de l'électricité passe dans le socle, et la mesure de sa résistivité permet d'estimer indirectement l'état géologique: la profondeur du socle, la profondeur de la couche altérée, le faciès et l'épaisseur des couches, la distribution des zones à pénétration d'eau salée etc. Cette méthode est jugée adaptée aux zones étendues, car elle est réalisable à coût bas et rapidement par rapport à l'étude par sondage. La précision de la prospection augmente si elle est combinée avec d'autres méthodes d'étude géologique telles que l'étude par sondage.

(1) Equipement nécessaire

Equipement de prospection lui-même, 4 électrodes, 4 câbles électriques, une batterie (ordinaire 12 V CC), 4 marteaux pour enfoncer les électrodes, corde de mesure

(2) Personnel

5 personnes (opérateur de l'équipement (1), installateur d'électrode (4))

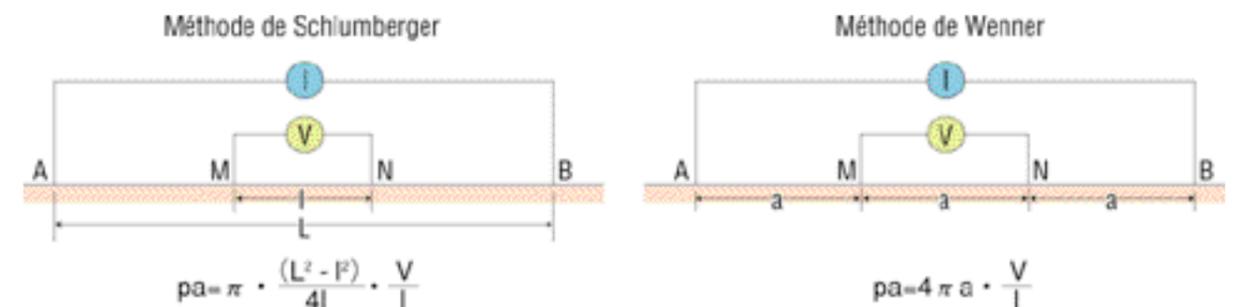
(3) Méthodes et principes de la prospection

L'électricité est transmise au socle par une électrode (pôle courant AB), et le champ électrique ainsi formé est mesuré par une autre électrode (pôle potentiel électrique MN).

La prospection se subdivise approximativement en prospection horizontale et prospection verticale. Pour la prospection horizontale, la paire d'électrodes est déplacée sur la ligne de mesure en maintenant constant l'écartement des électrodes, ce qui permet de mesurer la résistivité apparente ρ_a , ce qui permet de saisir la variation en direction horizontale de la résistivité du socle. La prospection verticale est une méthode dans laquelle l'écartement des électrodes a été graduellement agrandi, centré sur un point fixe, ce qui permet de connaître la variation de résistivité en fonction de la profondeur de ce point.

Il y a beaucoup de types de disposition des électrodes, mais les méthodes de Schlumberger et Wenner appliquées sur une ligne de mesure sont les plus utilisées. La méthode de Wenner, à écartement des électrodes égal, facile d'emploi, est beaucoup utilisée pour les zones d'étude de petite dimension, et la méthode de Schlumberger, adaptée à la prospection en profondeur, dans les zones d'étude de grande dimension. Les deux méthodes mesurent ρ_a à partir du courant transmis I , de la différence de potentiel mesurée V et de l'écartement des électrodes. La Figure 3.4.4 présente les dispositions des électrodes selon les méthodes de Schlumberger et Wenner et aussi les formules de ρ_a .

Fig.3.4.4 Exemple de dispositions des électrodes



En prospection verticale, l'analyse par méthode de courbe standard de la relation entre la résistivité apparente et l'écartement des électrodes, et l'analyse par la méthode de filtre linéaire par ordinateur, permettent d'obtenir la résistivité réelle de la couche et sa profondeur. La résistivité des couches est généralement prise dans les valeurs de la plage indiquée dans le Tableau 3.4.1, et la nature du sol est estimée à partir des cartes géologiques existantes, des résultats de l'examen de la nature du sol et de l'étude des puits existants.

Tableau 3.4.1 Relation entre la résistivité et la nature du sol (Meyer de Stadelhofen, 1991)

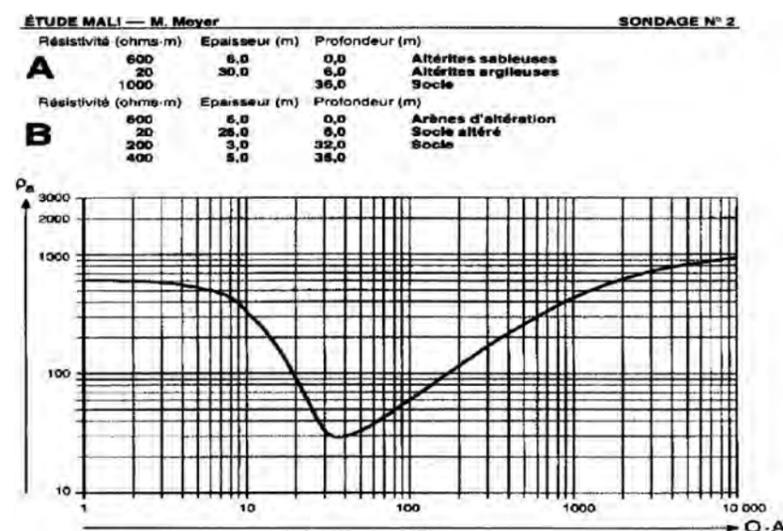
	Valeurs pour les formations saturées (Ω m)	Valeurs les plus fréquentes proches de (Ω m)
Argiles	5 à 10	10
Sables	50 à 400	60
Graviers	150 à 500	200
Schistes cristallins	100 à 10000	3000
Basaltes	10 à 50000	5000
Granites	100 à 50000	2000
Calcaires et dolomites	100 à 10000	
Eau de mer	<0,2	
Eaux douces de surface et de subsurface	10 à 300	
Eaux connées	0,05 à 10	
Limite de potabilité	2 à 6	

La démarche suivante est adoptée pour la prospection électrique.

① Sélection des emplacements de la prospection → ② Mise en place des électrodes et mesure de la résistance → ③ Calcul de la résistivité → ④ Tracé de la courbe ρ -a → ⑤ Analyse à partir de la courbe standard, de la courbe additionnelle, et/ou calcul de la valeur idéale par ordinateur .

La Figure 3.4.5 donne un exemple d'analyse de la prospection électrique, qui indique deux interprétations possibles.

Fig. 3.4.5 Exemple d'analyse de prospection électrique (Meyer de Stadelhofen, 1991)



Comme le montre cet exemple, l'estimation en se limitant à une structure géologique par courbe ρ -a est parfois difficile. Pour augmenter la précision de la prospection, l'analyse sera faite en tenant compte de résultats

tels que sondage, diaggraphie de puits par résistivité spécifique au même emplacement, et mesure directe de résistivité spécifique à l'extérieur.

Au Sahel, pendant la saison sèche, la surface du sol est asséchée, la résistance à la terre augmente, et le courant passe mal, ce qui fait baisser la précision de mesure. Dans ce cas, on peut verser de l'eau ou de l'eau salé sur la partie terre de l'électrode ou bien utiliser plusieurs électrodes.

7) Prospection par ondes sismiques

La prospection par ondes sismiques est une méthode d'estimation de la profondeur du socle, de la profondeur d'une zone altérée, du niveau d'eaux souterraines etc. par le biais de la vitesse de transmission des ondes sismiques (ondes sismiques) dans le socle. L'étude des ondes sismiques par réfraction en utilisant le phénomène de réfraction des ondes sismiques à la limite géologique des couches etc. est généralement utilisée pour l'étude géologique pour les travaux de génie civil et l'étude des eaux souterraines. De la dynamite etc. est souvent utilisée comme source de déclenchement des ondes sismiques, mais la méthode de déclenchement humaine simple ci-dessous est efficace pour la prospection des eaux souterraines peu profondes dans la plaine d'inondation des oueds (prospection par ondes sismiques simple). Les spécifications de la prospection par onde sismique simple sont indiquées ci-dessous.

(1) Equipement requis

Equipement de prospection, géophone, grand marteau, plaque de fer, commutateur de marteau, cordon, bande de mesure

(2) Personnel

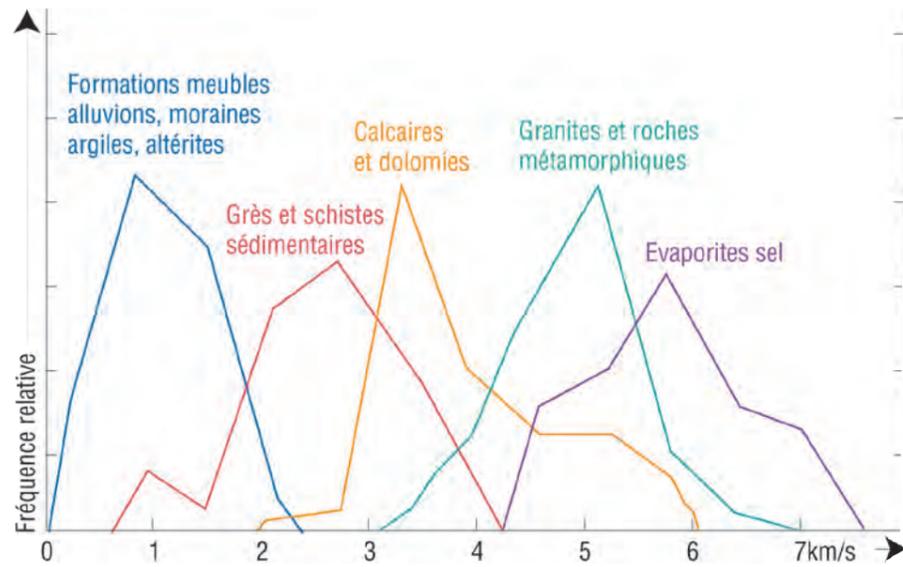
3 personnes (opérateur de l'appareil, enfonceur de marteau, 1 installateur de géophone)

(3) Principe de la prospection

En envoyant des ondes sismiques en sous-sol à partir d'une source sismique artificielle telle qu'explosif, une partie est réfléchié élastiquement sur les surfaces non continues telles que couches, est réfractée et revient à la surface du sol. Par conséquent, cette mesure permet de connaître la structure et les caractéristiques physiques du sous-sol. La méthode par réfraction mesurant l'onde arrivant en premier à chaque point de réception, autrement dit observant la première arrivée, la vitesse des ondes sismiques et la profondeur des surfaces non continues élastiques sont obtenues à partir de la courbe de déplacement-temps tracée pour le temps de la première arrivée par rapport à la distance, ce qui permet comme le montre la Figure 3.4.6 d'obtenir la vitesse, et d'analyser la structure souterraine en tenant compte de la relation entre la qualité des roches et la vitesse de l'onde sismique.

Le déclenchement par explosif, à grande énergie, a une longue ligne de mesure qui permet de prospector jusqu'en profondeur, mais leur utilisation est difficile sur le plan de la procédure et de la sécurité. Par contre, les coups de marteau à la main ont une petite énergie de déclenchement, mais cette méthode simple permet la prospection jusqu'à 20 m de profondeur environ, et est donc adaptée à la prospection des eaux souterraines peu profondes.

Fig. 3.4.6 Relation entre la vitesse des ondes sismiques et la nature du sol (Meyer de Stadeslhofen, 1991)

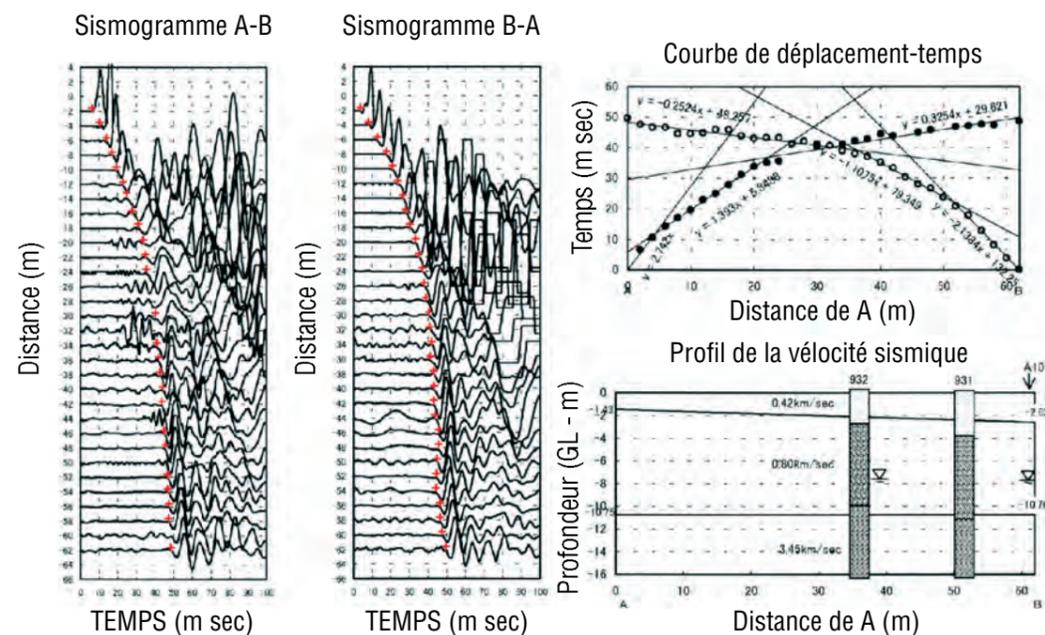


La procédure suivante est adoptée pour la prospection.

- ① Sélection de la ligne du côté prospection → ② Déclenchement → ③ Collecte des enregistrements des récepteurs → ④ Lecture de la première arrivée → ⑤ Etablissement de la courbe de déplacement-temps → ⑥ Calcul des sections de vitesses de l'onde sismique.

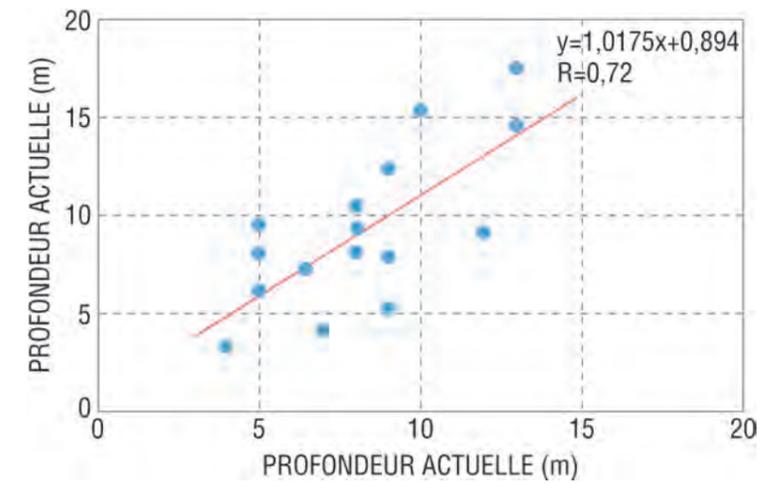
La Figure 3.4.7 indique des enregistrements de la prospection par ondes sismiques simples et les résultats d'analyse à la ferme pilote de Magou, Niger.

Fig. 3.4.7 Enregistrements de la prospection par ondes sismiques simples et exemple d'analyse à la ferme pilote de Magou, Niger



La Figure 3.4.8 indique une comparaison du résultat de la prospection par onde sismique simple et du sondage effectués à un même emplacement. Sur le plan de la nature du sol, la zone d'étude se compose de couches alluviales et d'un socle en granites. Un écart de +/-5 m a été obtenu entre la profondeur du socle estimée par prospection par onde sismique simple et la profondeur du socle mesurée par sondage, mais le coefficient de corrélation 0,72 est relativement bon. Cela a permis de vérifier que la prospection par onde sismique simple est une méthode efficace pour prévoir la limite entre la couche alluviale et le socle. De même, si les eaux souterraines sont peu profondes, la détection de la limite entre la couche alluviale saturée et la couche alluviale non saturée est aussi possible, ce qui permet d'estimer le niveau des eaux souterraines.

Fig. 3.4.8 Profondeur du socle mesurée et profondeur du socle analysée dans les environs de Magou, Niger



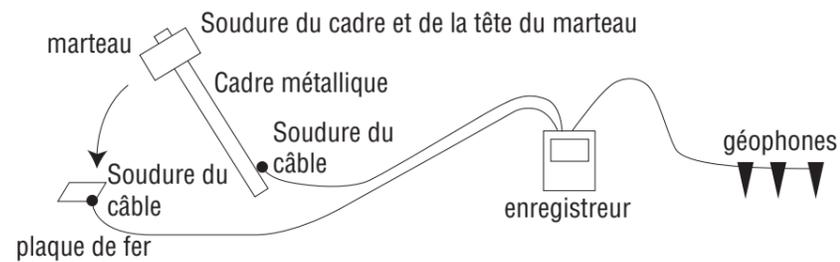
(4) Points à noter pour la prospection par ondes sismiques

- a) Dans le cas de la prospection par ondes sismiques par réflexion, à cause de contraintes de principe, les ondes réfléchies ne peuvent atteindre la surface du sol si elles ne sont pas aussi rapides que dans les couches profondes, ce qui rend la prospection impossible. Par conséquent, elle n'est pas adaptée à une zone à couche de latérite dure en surface. De plus, si la couche moyenne est fine, il est possible qu'elle ne soit pas détectée.
- b) La longueur du câble de mesure doit être de 5 à 7 fois la profondeur de prospection. La limite de la longueur du câble est 100 m en cas de déclenchement par coup de marteau.
- c) Comme le bruit a tendance à augmenter sous l'influence du vent, les moments de grand vent sont à éviter pour la prospection. Eloigner le récepteur des arbres permet parfois de réduire le bruit. Selon les modèles, le rapport signal/bruit peut être réduit par empilage numérique.
- d) Le ruban de mesure pour la mesure de la distance est un canal de transmission du bruit. Piétiner le ruban entre le point de déclenchement et le point de réception absorbe le bruit et permet d'obtenir un bon signal.

e) Si le bruit ne peut pas être éliminé, il arrive que le bruit soit réduit en décalant le point de déclenchement le long du câble.

f) En prospection par ondes sismiques simples, un commutateur intégrant un microphone condensateur (commutateur de marteau) est fixé au marteau pour la détection du moment où est donné le coup de marteau. A la place de commutateur de marteau, la méthode à déclencheur simple transmettant le signal à l'équipement de prospection par court-circuitage du circuit au moment du coup, indiqué par la Figure 3.4.9, permet aussi une bonne détection.

Fig. 3.4.9 Modélisation du déclencheur simple



8) Etude par sondage

L'étude par sondage permet de confirmer la nature du sous-sol par prélèvement de noyaux par forage direct dans le sol. Le coût du forage mécanique est élevé au Niger, environ 100.000 FCFA/m. C'est pourquoi des études préliminaires telles que reconnaissance géologique et prospection géophysique doivent être suffisamment réalisées pour permettre de sélectionner des emplacements d'étude les mieux adaptés. Comme le prélèvement de carotte est difficile dans les sédiments non consolidés et les zones altérées, le jugement de la nature du sol sera fait sur la boue de forage.

La sonde à cuiller de creusement manuel est une méthode de sondage simple. Aux emplacements à couches alluviales ou altérées meubles, la couche de surface est creusée à la pelle etc. comme le montre la Figure 3.4.10, puis la sonde à cuiller est utilisée pour creuser jusqu'à 9 m et faire des prélèvements. Pour le forage au-dessous de la surface d'eau souterraine avec la sonde à cuiller, un tubage doit être installé pour éviter l'effondrement des parois du trou. Mais le creusement de couches d'agglomérés est difficile.

Si le niveau des eaux souterraines est relativement peu profond, il est possible comme indiqué plus loin d'utiliser le trou creusé avec la sonde à cuiller pour effectuer des essais de pompage simples. Ce puits peut aussi servir de puits d'observation pour les essais de pompage des puits.

Fig. 3.4.10 Exemple de creusement par sonde à cuiller



Les carottes et la boue obtenues par creusement seront classées dans un profil stratigraphique comme sur la Figure 3.4.11 par type, grain et couleur.

Après le creusement, un tuyau en PVC à trous est inséré dans le trou creusé et fini en tant que trou d'observation, permettant l'observation du niveau des eaux souterraines. Si un trou d'observation est creusé à un emplacement inondable pendant la saison des pluies comme la plaine d'inondation d'un oued, il faudra sceller l'espace entre le tube en PVC et la paroi du trou avec de l'argile et du ciment pour éviter la pénétration d'eau de surface. Pour éviter les jeux des enfants (lancer d'objets qui souvent finissent par obstruer le trou), la margelle sera surélevée de plus de 1,5 m au-dessus du sol, ou bien un couvercle avec clé sera mis en place. Il faudra aussi clôturer autour du trou pour éviter les dégâts causés par le bétail.

Fig. 3.4.11 Exemple de profil stratigraphique (Castany, 1982)

ETAGES	Formations litho-stratigraphiques	Profondeurs (mètres)	Figurées lithologiques	Formations hydrogéologiques
CÉNOMANIZIEN	grès massifs	60,50	[Symbol]	niveau piezométriques ascendants
	grès	72	[Symbol]	
ALBIEN SUPERIEUR	marne de Brienne	90,50	[Symbol]	TOIT DE L'AQUIFERE
	marne plastique glauconieuse		[Symbol]	
ALBIEN MOYEN	argiles du saut	100,50	[Symbol]	AQUIFERE
	sables de Fésérbauc	133,50	[Symbol]	
	grès blancs peu cimentés, puis sables jaunes très grossiers		[Symbol]	
ALBIEN INFÉRIEUR	argiles régulières	143	[Symbol]	MULTICOUCHE ALBIEN
	sables et grès des grillons	156	[Symbol]	
	argiles de l'Aracide	170,50	[Symbol]	
	argiles sablonneuses		[Symbol]	
AITÉN	sables verts	186	[Symbol]	SUBSTRATUM DE L'AQUIFERE
	sables glauconieux		[Symbol]	
	argile plastique	214,50	[Symbol]	
AITÉN	sables blancs	216,50	[Symbol]	AQUIFERE
	argiles panachées		[Symbol]	

9) Etude par essai de forage

C'est la méthode la plus sûre pour saisir les caractéristiques de la couche aquifère. L'observation et le dessin de la paroi pendant le creusement, l'établissement d'un profil statigraphique et l'observation de l'état de la source d'eau à partir de la paroi du puits sont réalisés dans cette étude. Il est souhaitable que le puits soit achevé en progressant jusqu'au socle difficile à pénétrer, mais comme il est difficile manuellement de creuser plus profondément que la surface d'eaux souterraines, il faut creuser quand le niveau des eaux souterraines est au plus bas. Voir le paragraphe 4.4 Exploitation des eaux souterraines par puits pour le creusement de puits et la finition.

10) Essais de pompage

Les essais de pompage permettent de saisir la capacité d'un puits et l'état de la couche aquifère d'un puits existant ou d'un puits nouvellement construit par pompage de l'eau souterraine. Les essais portent sur la mesure : temps à partir du début du pompage et temps à partir de l'arrêt du pompage, variation dans le temps du niveau des eaux souterraines et volume pompé.

Les essais de pompage peuvent être échelonnés ou bien continus. Les essais de pompage échelonnés permettent de saisir la capacité du puits, autrement dit le volume d'eau pompable, alors que les essais de pompage continus sont réalisés pour analyser la constante hydrologique de la couche aquifère. Les essais de pompage peuvent être effectués sur les trous creusés par sonde à cuiller (essais de pompage simples). Par ailleurs, la méthode simple du Comité Inter-Africain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H., 1982 et 1988) largement utilisée dans le Sahel, est incluse dans les essais de pompage continus.

La pompe de pompage doit pouvoir pomper des eaux souterraines situées à 6-7 m au-dessous de la surface du sol; une motopompe immergée est utilisée si les eaux sont plus profondes. Si le coefficient de pénétration de la couche aquifère est faible, il est possible d'utiliser une pompe manuelle ou un seau de puits.

Un notch triangulaire peut aussi être utilisé pour mesurer le volume pompé, et le volume calculé à partir du temps requis jusqu'à ce que le récipient à volume connu tels que bidon soit plein. Comme le volume pompé diminue quand le niveau d'eau baisse suite au pompage, il est nécessaire de régler à un volume de pompage fixe en ajustant la puissance de la pompe ou par action de soupape, ce qui est difficile à réaliser dans la pratique. Avant le pompage réel, il faut ainsi effectuer des pompages préliminaires pour s'habituer aux ajustements, et étudier à quel niveau fixer le volume à pomper.

L'eau pompée doit être évacuée le plus loin possible du trou pour éviter qu'elle y pénètre à nouveau.

(1) Essai de pompage échelonné

L'essai de pompage échelonné est une méthode permettant de définir la capacité du puits à partir de la relation entre le volume de pompage modifié de manière échelonnée et la baisse du niveau d'eau. Ces essais permettent de mettre au clair le volume d'eau pompable de manière stable, puis de le fixer pendant les essais de pompage continus. Cet essai doit être omis si le volume d'eau pompable est faible et que sa variation échelonnée est difficile.

(2) Essai de pompage continu

L'essai de pompage continu est une méthode d'enregistrement de la baisse du niveau d'eau et le temps de

rétablissement du niveau après arrêt du pompage après avoir pompé en continu d'un volume fixé pendant un temps donné. Comme méthode d'analyse de la constante hydrologique, la méthode de Theis ou Jacob ou la méthode de rétablissement sont généralement employées. L'essai de pompage du puits seul est possible. Mais il est souhaitable de creuser un trou d'observation à environ 5 - 10 m du puits, et de mesurer le niveau d'eau souterraine. Comme le montre le Tableau 3.4.2, l'intervalle de mesure du niveau d'eau est court au début du pompage, et peut être allongé à mesure que le temps passe.

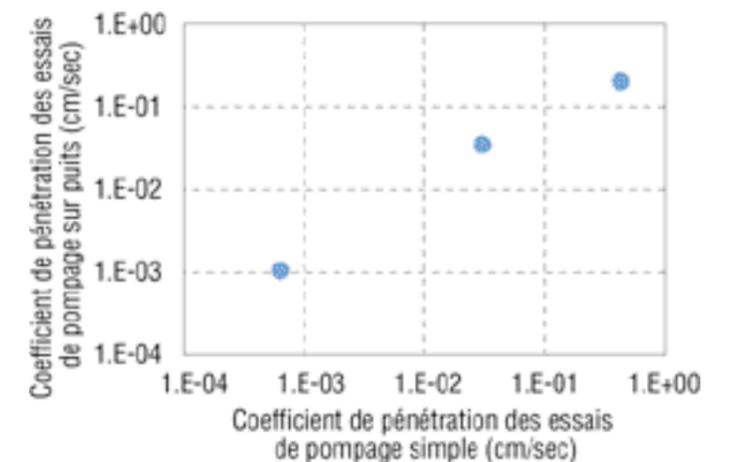
Tableau 3.4.2 Intervalle de mesure du niveau d'eau dans les essais de pompage (Brassingtonn, 1983)

Temps écoulé à partir du début du pompage	Intervalle de mesure
0-5 min	30sec
5-10 min	1 min
10-20 min	2 min
20-60 min	5 min
60-100 min	10 min
100 min-4 hrs	15 min
4-8 hrs	30 min

(3) Essai de pompage simple

Les essais de pompage en utilisant un trou creusé par sonde à cuiller (essais de pompage simples) permettent de saisir avec une précision relativement bonne et à coût bas l'état de la couche aquifère. Effectuer des essais de pompages simples avant de creuser le puits permet de réduire les risques pour la construction de puits. Un trou de 150 mm de diamètre est creusé, et un tuyau en PVC d'environ 100 mm de diamètre formé en crépine est inséré. La méthode de pompage est identique à celle utilisée pour les puits. La Figure 3.4.12 montre l'illustration comparative des résultats de pompage sur un puits et un trou creusé par sonde à cuiller sur un même site, et le coefficient de pénétration calculé coïncide relativement bien. Mais cette méthode se limite à une profondeur de creusement avec la sonde à cuiller de 9 m environ, elle n'est pas utilisable pour les niveaux d'eaux souterraines plus profonds.

Fig. 3.4.12 Comparaison entre les essais de pompage simple et les essais de pompage sur puits



11) Etude de la qualité de l'eau

Comme pour l'étude des eaux de surface, l'étude de la qualité de l'eau a pour objectif de vérifier si la qualité de l'eau est adaptée aux objectifs prévus. Elle est aussi efficace pour estimer l'origine des eaux souterraines et son mécanisme d'écoulement. Les rubriques d'analyse sont conformes à celles de l'étude des eaux de surface. La qualité de l'eau variant avec les saisons, il est nécessaire d'effectuer l'étude au moins deux fois: pendant la période de hautes eaux et pendant la période de basses eaux. Avant le prélèvement, l'eau dans le puits est pompée dans une certaine mesure pour pouvoir obtenir un échantillon neuf. Comme des éléments sont à analyser immédiatement après le prélèvement, après leur analyse, les échantillons sont placés dans un récipient propre et envoyés à l'organisme d'analyse.

12) Etude du volume de pompage réel

L'étude du volume de pompage réel est faite sur un puits existant pour obtenir des données de base pour la définition du projet d'utilisation de l'eau à la lumière du volume de pompage journalier et des applications. Le volume d'eau pompé étant difficile à saisir par enquête par interview, il est nécessaire de faire l'étude au puits du matin au soir. Une étude au moins doit être faite pendant la saison de pluie et la saison sèche, pour estimer le volume de pompage annuel. Le Tableau 3.4.3 montre les résultats de l'étude du volume de pompage réel effectué dans le village de Yakouta, Burkina Faso.

Tableau 3.4.3 Etude du volume de pompage réel par foyer dans le village de Yakouta, Burkina Faso (août 1998)

Chef de famille	Village d'appartenance	Nbre de foyers	Volume pompé (l)			Volume réellement utilisé (l)			Volume moyen consommé (l/jour/personne)
			25 août	26 août	27 août	25 août	26 août	27 août	
H.M	Louguereli	8	60	45	30	50	34	20	4,3
A.A	Louguereli	10	66	100	55	46	80	52	5,9
B.A	Louguereli	8	42	48	45	29	31	38	4,1
H.A	Mango	7	48	48	76	43	36	66	6,9
D.S	Mango	19	54	76	84	34	41	61	2,4
A.H	Mango	7	45	49	39	40	49	29	5,6
H.S	Diarriel	26	120	120	120	105	92	88	3,7
H.H	Diarriel	6	60	75	65	55	58	37	8,3
B.H	Diarriel	19	162	78	143	149	75	118	6,0
Moyenne									5,2

3.4.3 Analyse des résultats de l'étude

L'analyse des eaux souterraines est effectuée pour diviser la couche aquifère sur la base des différentes études de la situation actuelle, saisir son extension et ses particularités, et mettre au clair le volume de réserve d'eaux souterraines et le volume utilisable.

1) Classification des couches aquifères

Les roches et les couches peuvent être divisées en couches facilement traversables, couches difficilement pénétrables et couches semi-perméables à caractéristiques moyennes. Les couches aquifères sont des couches et roches perméables d'une certaine épaisseur et extension, contenant des eaux souterraines utilisables. De plus, une couche aquifère est ordinairement délimitée par un socle difficilement pénétrable et une couche pressurisée.

En général, les couches aquifères sont divisées par nom de couche de leur époque géologique. Cela parce que les couches et roches d'une région donnée formées à une certaine époque géologique, et ayant les mêmes origine et historique, ont souvent les mêmes caractéristiques physiques et chimiques, et sont divisés en couches aquifères identiques.

La division des couches aquifères se fait d'abord par division géologique de la zone concernée, puis étude de l'inclusion d'eaux souterraines par combinaison de la distribution des puits, et de leur taille en tant que couche aquifère. Si la couche a un caractère de couche aquifère, la structure hydrogéologique est vérifiée par prospection géologique, prospection géophysique, étude par sondages etc. et si une certaine communauté est reconnue, elle sera considérée comme une même couche aquifère. La saisie de la variation du niveau d'eau et du volume d'eau pompable de la couche aquifère divisée permettra de mettre au clair l'état de ses réserves d'eau.

Le Tableau 3.4.4 donne l'exemple de la division des couches aquifères en couche aquifère alluviale, couche aquifère tertiaire et couche aquifère du socle dans la zone de la rivière Goroubi. Le classement de ces rubriques pour la nature de couches aquifères permet d'estimer le type et la profondeur des puits, la période de pompage possible, le volume d'eau pompable etc. pour l'exploitation.

Tableau 3.4.4 Classement des couches aquifères de la zone de la rivière Goroubi et particularités

Particularités/couche aquifère	Couche alluviale	Couche tertiaire	Socle
Lieu de distribution	Lit de rivière, plaine d'inondation d'oued	Mésa, buttes	Pénéplaine
Structure de la couche aquifère	Couches alternées de limon, sable et gravier	Couches alternées de microgrès et grès	Couche altérée de granits et roches métamorphiques et zones de fracture
Epaisseur	Moins de 20 m	Moins de 50 m	Quelques m à plus de 30 m
Type d'eaux souterraines	Non pressurisées	Non pressurisées	Non pressurisées, partiellement pressurisées
Niveau des eaux souterraines (sous la surface)	0~-6 m	-10~-40 m	-5~-25 m
Ampleur des variations annuelles	3~8 m	0,5~8 m	Moins de 3 m
Capacité de pompage (par puits)	900 m ³ /jour max.	50 - 100 m ³ /jour	10 - 20 m ³ /jour
Coefficient du volume infiltré	5 x 10 ⁻³ m ³ /s en moyenne (10 ⁻² ~10 ⁻³ m ² /s)	10 ⁻⁴ m ² /s en moyenne	2,5 x 10 ⁻⁴ m ² /s en moyenne (10 ⁻³ ~10 ⁻⁵ m ² /s)
Coefficient de pénétration	1 x 10 ⁻¹ cm /s en moyenne (10 ⁻¹ ~10 ⁻² cm /s)	10 ⁻² cm/s en moyenne	5 x 10 ⁻³ m ² /s en moyenne (10 ⁻² ~10 ⁻³ cm /s)
Qualité de l'eau (valeur moyenne)	PH=6,6, EC=210µS/cm Ca(HCO ₃) ₂ Type	PH=6,0, EC=68µS/cm CaSO ₄ Type	PH=7,2, EC=460µS/cm Ca(HCO ₃) ₂ Type

La Figure 3.4.13 indique la répartition des couches tertiaires et du socle aux environs du village de Magou, Niger. Des granites du socle exposés affleurent par endroits dans cette zone, comme indiqué en bas à droite de la photo. De plus, des couches tertiaires forment la mesa.

Fig. 3.4.13 Mesa de la couche tertiaire et affleurement du socle (granitique)



2) Analyse des essais de pompage

(1) Calcul des constantes hydrologiques

Les constantes hydrologiques des couches aquifères obtenues par les essais de pompage continu sont de deux types: coefficient du volume infiltré (T) et coefficient de stockage (S).

Le coefficient du volume infiltré peut être obtenu en soustrayant le coefficient de pénétration (K) de l'épaisseur de la couche. Les trois méthodes d'analyse ci-dessous sont généralement utilisées, mais la méthode de rétablissement ne permet pas d'obtenir le coefficient de stockage.

(a) Méthode de Theis

La relation entre le volume de pompage, la baisse du niveau d'eau et le temps de pompage lors du pompage d'eau souterraine d'un puits peut être exprimée par la formule ci-dessous si l'on pense être en présence d'un état non-stationnaire.

$$W(u) = \left(\frac{4\pi T}{Q} \right) \cdot s \dots\dots ① \quad u = \frac{S}{4T} \cdot \frac{r^2}{t} \dots\dots ②$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \dots\dots ③$$

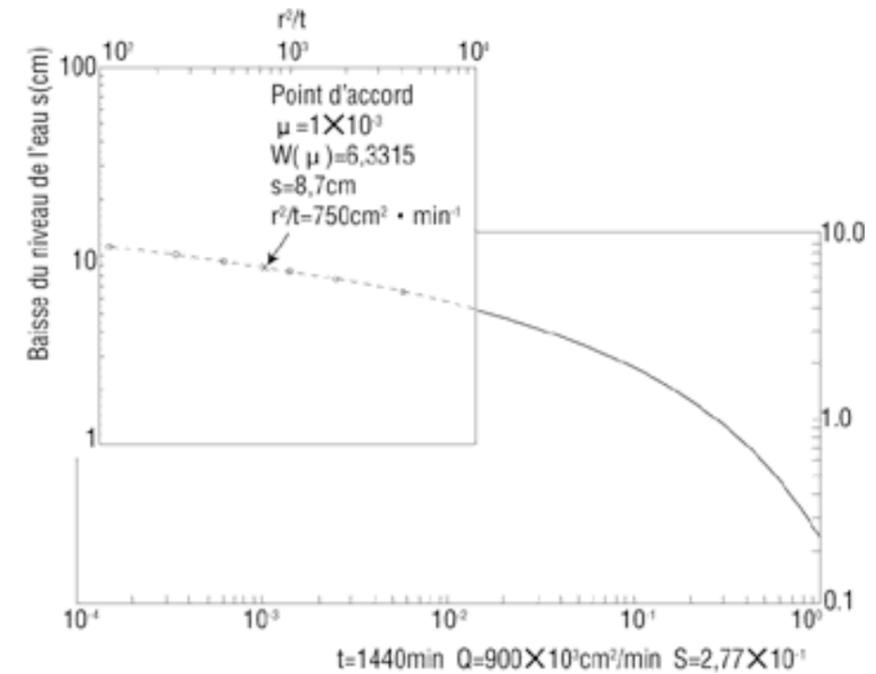
- Q: Volume de pompage
- t: Temps de pompage
- r: Distance à partir du puits
- s: Baisse du niveau d'eau
- T: Coefficient du volume d'infiltration
- W(u): Coefficient du puits
- S: Coefficient de stockage

Comme la partie entre parenthèses est fixe dans les formules ① et ② ci-dessus, la relation entre W(u) et u

devient la relation entre S et r^2/t . La valeur de W(u) par rapport à u a été tracée sur un graphe bilogarithmique, c'est ce qu'on appelle la courbe standard de Theis. S et r^2/t obtenus au cours des essais de pompage ont été tracés sur un graphe bilogarithmique de même taille que la courbe standard, et les deux graphes ont été superposés en les déplaçant verticalement et horizontalement. En faisant coïncider les deux courbes des graphes, on obtient le point arbitraire (point d'accord) de W(u), u, s et r^2/t , qui est entré dans les formules ① et ② ci-dessus pour obtenir T et S.

La courbe standard de Theis et un exemple d'analyse sont indiqués sur la Figure 3.4.14

Figure 3.4.14 Exemple d'analyse par la méthode de Theis (Livret technique des eaux souterraines révisé en 1998)

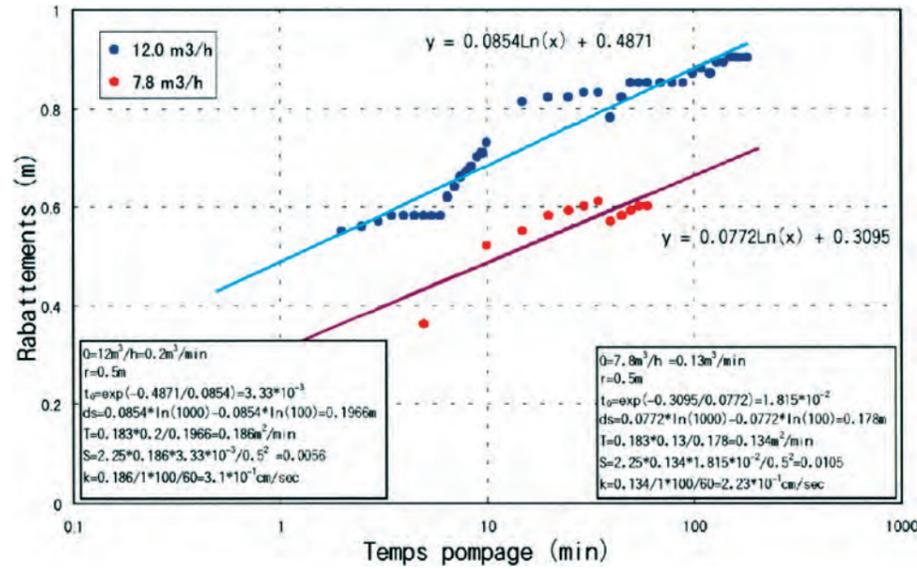


(b) Méthode de Jacob

C'est une méthode simplifiée de la méthode de Theis. Sur papier quadrillé logarithmique, le temps à partir du début du pompage est indiqué sur l'axe horizontal et la baisse du niveau d'eau sur l'axe vertical. Comme il est rare que la courbe soit une ligne droite, le tracé du côté droit est approché de la ligne droite, t_0 est obtenu aux coordonnées X du point où la ligne droite approximative coupe l'axe horizontal, et ds de baisse du niveau des eaux souterraines aux environs du cycle logarithmique 1, puis T et S sont calculés avec la formule ci-dessous. La Figure 3.4.15 donne un exemple d'analyse pour des puits construits dans la couche aquifère alluviale du lit de la rivière Goroubi, Niger. Dans cet exemple, si un trou d'observation n'est pas creusé, la fiabilité du coefficient de stockage S est faible, et la valeur indiquée ne doit être utilisée qu'à titre de référence.

$$T = \frac{0,183Q}{ds} \quad S = \frac{2,25T \cdot t_0}{r^2}$$

Fig. 3.4.15 Exemple d'analyse avec la méthode de Jacob

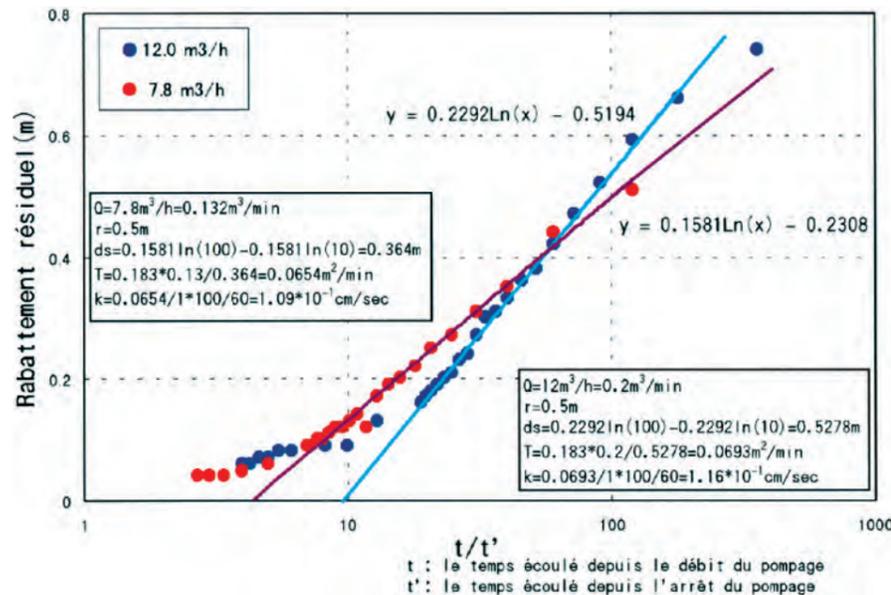


(c) Méthode de rétablissement

Sur papier quadrillé logarithmique, le temps écoulé depuis le début du pompage(t)/temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (t') est indiqué sur l'axe horizontal et la baisse du niveau résiduelle (différence avec le niveau initial) sur l'axe vertical. Comme il est rare que la courbe soit une ligne droite, le tracé du côté gauche est approché de la ligne droite et ds de baisse du niveau des eaux souterraines aux environs du cycle logarithmique 1 est obtenu, et T est calculé avec la formule ci-dessous. La Figure 3.4.16 montre le calcul avec la méthode de rétablissement pour le même puits que la figure précédente.

$$T = \frac{0,183Q}{ds}$$

Fig. 3.4.16 Exemple d'analyse avec la méthode de rétablissement

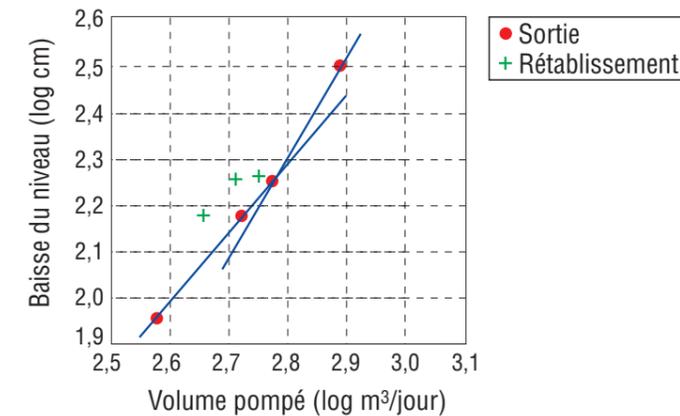


(2) Analyse du volume pompable du puits

Le volume d'eau pompable du puits est obtenu à partir des essais de pompage échelonné. Dans cette méthode, le volume d'eau maximum pompable provisoirement est le volume pompé au moment d'une baisse de niveau brutale, obtenu par la relation entre le volume pompé et la baisse du niveau lors des essais de pompage échelonnés à volume de pompage modifié.

La Figure 3.4.17 montre les résultats des essais de pompage échelonnés dans la couche aquifère alluviale du lit de la rivière. La baisse du niveau augmente à partir de $10^{2,78}$ m³/jour (600 m³/jour) environ. La baisse du niveau augmente parce que si la vitesse du flux dépasse une valeur donnée, l'écoulement des eaux souterraines passe de flux de couche à flux turbulent, et dans ce cas, un phénomène d'évacuation du sable avec les grains de sable de la couche aquifère qui s'écoulent dans le trou du forage, survient. Par conséquent, le pompage est considéré stable au-dessous de ce volume.

Fig. 3.4.17 Exemple de volume pompé et baisse du niveau dans la couche aquifère alluviale de la rivière Goroubi, Niger



Si les essais de pompage échelonnés sont impossibles parce que le volume pompé est faible, il y a une méthode d'estimer le volume d'eau pompable à partir du rétablissement des eaux souterraines après l'arrêt du pompage. Après le pompage continu d'un certain volume d'eau, l'eau souterraine se rétablit après l'arrêt du pompage. Ce volume de rétablissement est le volume d'eau pompable au moment où le rétablissement est possible, jusqu'au début du pompage suivant. La Figure 3.4.18 montre la relation entre le volume d'eau pompé et le temps de rétablissement du niveau d'eau dans la couche aquifère du socle, et la Figure 3.4.19 montre la relation entre le volume pompé et la baisse du niveau pour le même puits. Si l'on considère le temps de fonctionnement du puits de 8 heures par jour (8 h - 16 h), le temps de rétablissement jusqu'au jour suivant est de 16 h. D'après la Figure 3.4.18, le volume journalier total pompé après rétablissement complet (baisse du niveau résiduelle 0 cm) est de 12 m³, et de 20 m³ pour une baisse du niveau résiduelle de 50 cm. D'après la Figure 3.4.19, les baisses de niveau sont alors respectivement 4,2 m et 7,4 m. La profondeur du trou de ce puits est suffisante pour supporter cette baisse du niveau d'eau, mais si une profondeur suffisante n'est pas obtenue, la profondeur du trou définira le volume pompable. Dans ce calcul, le volume d'eau pompable n'influençant pas le niveau d'eau initial le jour suivant est de 12 m³ /jour environ. Cette méthode est pratique quand le volume d'eau pompable est obtenu par pompage manuel, par exemple par seau de puits.

Fig. 3.4.18 Volume pompé et temps de rétablissement du niveau d'eau

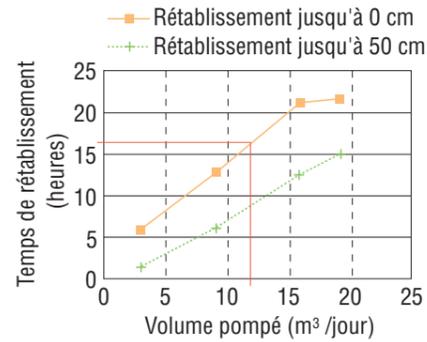
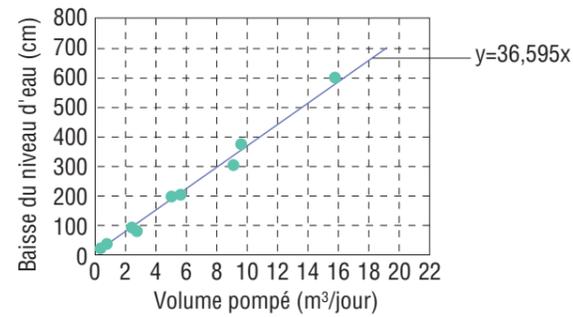


Fig. 3.4.19 Volume pompé et baisse du niveau d'eau



Le volume d'eau pompable varie en fonction des variations saisonnières du niveau des eaux souterraines, et si le niveau des eaux souterraines baisse, le volume d'eau pompable aussi. Pour faire une prévision, le calcul doit être effectué avec la formule non-équilibrée ci-dessous en utilisant la constante hydrologique obtenue aux essais de pompage continus.

Pour les puits complets dont le fond atteint la base de la couche aquifère pressurisée, la baisse du niveau des eaux souterraines due au pompage est exprimée par la formule de Theis ci-dessous. Cette formule est applicable aussi pour une couche aquifère non pressurisée à faible baisse du niveau d'eau (en général, moins de 10% de la profondeur d'eau).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad u = \frac{Sr^2}{4Tt}$$

Par ailleurs, le niveau d'eau rétabli après l'arrêt du pompage est exprimé par la formule ci-dessous.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \{W(u_1) - W(u_2)\} \quad u_1 = \frac{Sr^2}{4Tt} \quad u_2 = \frac{Sr^2}{4Tt'}$$

- s: Baisse du niveau d'eau
- S: Coefficient de stockage
- T: Coefficient du volume infiltré
- Q: Volume pompé
- W(u): Fonction du puits
- t: Temps écoulé depuis le début du pompage (temps de rétablissement compris)
- t': Temps écoulé depuis l'arrêt du pompage
- r: Distance à partir du centre du puits (pour le niveau d'eau dans le puits, le rayon du puits)

La fonction du puits W(u) peut être obtenue approximativement avec la formule ci-dessous.

$$\text{Dans le cas où } 0 \leq u \leq 1 \quad W(u) = -\ln u + C_0 + C_1u + C_2u^2 + C_3u^3 + C_4u^4 + C_5u^5$$

$$\text{Dans le cas où } 1 < u < \infty \quad W(u) = \frac{1}{u \cdot e^u} \cdot \frac{C_6 + C_7u + U_2}{C_8 + C_9u + U_2}$$

où: $C_0 = -0,57721566$ $C_1 = 0,99999193$ $C_2 = -0,24991055$ $C_3 = 0,05519968$ $C_4 = -0,00976004$
 $C_5 = 0,00107857$ $C_6 = 0,250621$ $C_7 = 2,334733$ $C_8 = 1,681534$ $C_9 = 3,330657$

La Figure 3.4.20 a été obtenue par tracé de la baisse du niveau d'eau prévue par ce calcul et les valeurs d'observation au moment des essais de pompage réels. Dans ce cas, les variations saisonnières du volume pompable ont pu être prévues, comme l'indique le Tableau 3.4.5, après calcul sur modifications diverses du niveau d'eau et du volume pompé, parce que les valeurs calculées et les valeurs mesurées coïncident relativement bien.

Fig. 3.4.20 Valeurs mesurées aux essais de pompage sur la couche aquifère alluviale et valeurs de baisse du niveau d'eau calculées

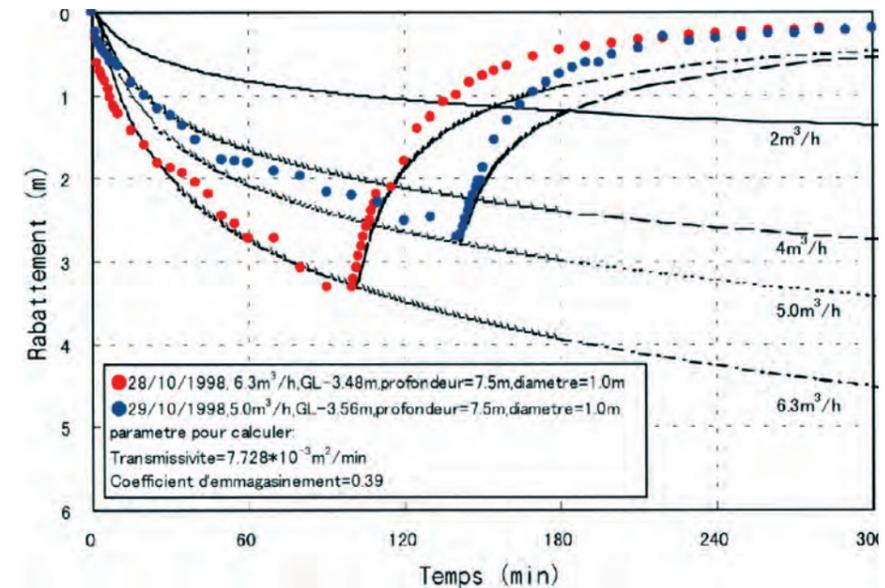


Tableau 3.4.5 Prévisions des variations saisonnières du volume pompable

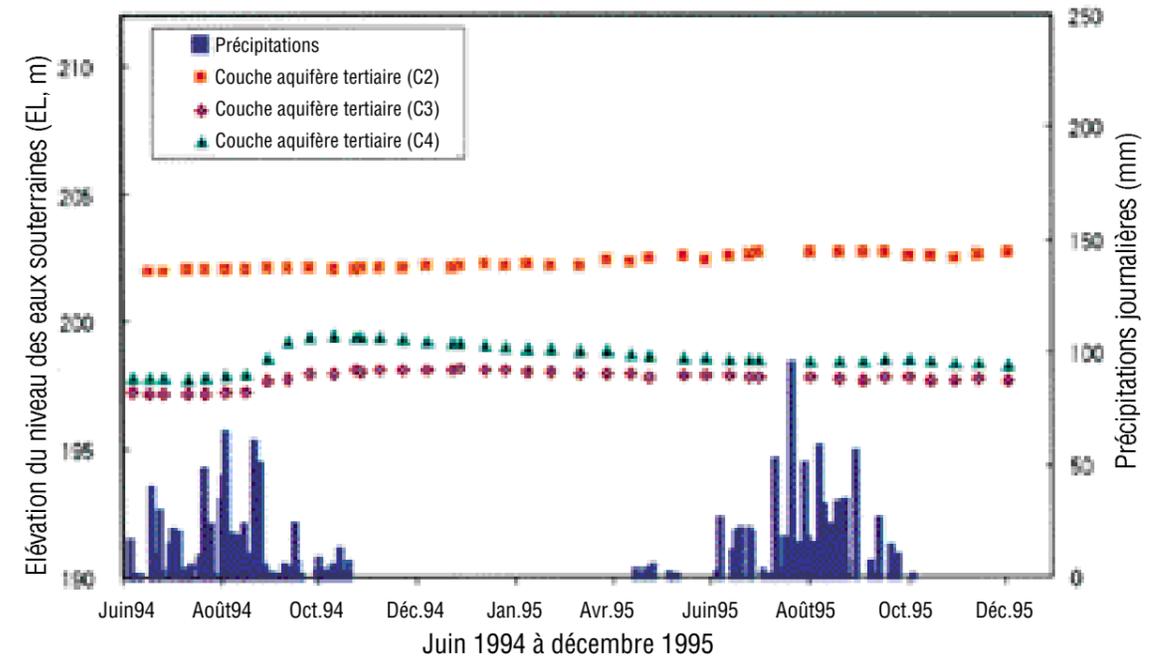
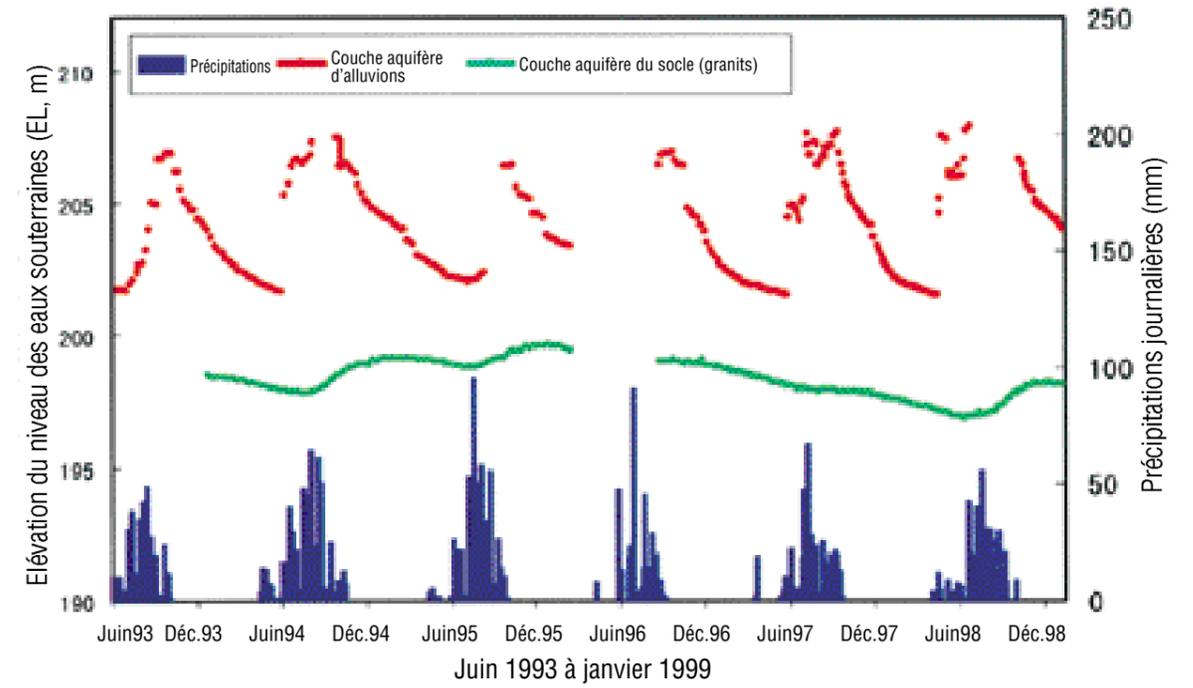
MOIS	NIVEAU STATIQUE (m)	HAUTEUR D'EAU (m)	PARAMETRE		QUANTITE D'EAU pompée 5 heures (m³/jour)
			COEFFICIENT D' EMMAGASINEMENT	TRANSMISSIVITE (m²/min)	
NOV	4,00	4,50	0,39	0,00699	30,5
DEC	4,78	3,72	0,39	0,00578	21,9
JAN	5,25	3,25	0,39	0,00505	17,3
FEV	5,44	3,06	0,39	0,00476	15,7
MAR	5,58	2,92	0,39	0,00454	14,4
AVR	5,72	2,78	0,39	0,00432	13,3

3) Analyse des variations du niveau des eaux souterraines

Les eaux souterraines connaissent des baisses et des montées de niveau qui se répètent de façon cyclique tous les ans, et l'ampleur de cette variation est influencée par les précipitations. La Figure 3.4.21 indique la variation du niveau d'eau de 3 couches aquifères du bassin de la rivière Goroubi, Niger. La variation du niveau d'eau est importante dans les couches aquifères alluviales, et le niveau d'eaux souterraines est peu profond. La variation du niveau d'eau est faible dans la couche aquifère du socle, mais le niveau d'eau est profond. La couche aquifère tertiaire a des caractéristiques proches de celles de la couche aquifère du socle. Les données d'observation ainsi classées peuvent mettre au clair la tendance de variation du niveau d'eau et servir de données de référence pour la sélection de la profondeur et du type de puits. Le volume d'eau pompable est une donnée importante pour l'estimation des variations saisonnières. C'est aussi une donnée de base pour l'analyse du bilan hydrologique général y compris des précipitations, eaux de rivières et eaux souterraines.

L'observation des variations du niveau des eaux souterraines au fil des années sur une longue période permet de juger de l'état du bilan hydrologique des couches aquifères. Les variations du niveau des eaux souterraines au fil des années changent généralement par augmentation/baisse des précipitations annuelles. Si le niveau des eaux souterraines a tendance à baisser alors que les précipitations annuelles ne changent pratiquement pas, on peut penser à l'influence de la variation de l'état de recharge des eaux souterraines ou bien du pompage excessif des eaux souterraines. Pour l'utilisation durable des eaux souterraines, il est nécessaire de surveiller suffisamment les tendances du niveau des eaux souterraines.

Fig. 3.4.21 Variation du niveau des eaux souterraines par couche aquifère



Chapitre 4 Techniques de développement des ressources en eau

4.1 Sélection des méthodes de développement des ressources en eau

Il est nécessaire de sélectionner une méthode d'exploitation des ressources en eau adaptée, en fonction de l'état des ressources en eau mis au clair par l'étude de l'état actuel. Pour cette sélection, non seulement les conditions naturelles, mais aussi des conditions sociales comme l'importance de la demande en eau dans la zone concernée, le mode de vie, les activités de production, ou bien les souhaits des habitants doivent être pris en compte.

Le Tableau 4.1.1 montre les formes de réserve et les principales méthodes d'exploitation des réserves d'eaux souterraines dans le Sahel.

Tableau 4.1.1 Formes de réserves et méthodes de développement des ressources en eau dans le Sahel

Formes des réserves de ressources en eau		Méthodes de développement des ressources en eau
Eaux de surface	Grandes rivières et lacs (eau de surface permanentes)	Grand barrage
	Oueds (eaux de surface pendant la saison de pluie)	Petit barrage
	Mares (eaux de surface pendant la saison de pluie et pendant quelques mois après la fin de la saison des pluies)	Aménagement de mare
Eaux souterraines	Couche aquifère alluviale (eaux souterraines non pressurisées)	Puits, Forage
	Couche aquifère tertiaire (eaux souterraines non pressurisées)	Barrage de recharge souterrain
	Couche aquifère du socle (eaux souterraines non pressurisées et pressurisées)	Barrage souterrain

Les barrages d'interception de rivière et les puits sur les eaux souterraines sont des techniques qui permettent de fournir des ressources en eau et de les utiliser efficacement. Et pour l'utilisation combinée des eaux des rivières et des eaux souterraines, il y a des techniques de barrage de recharge des eaux souterraines qui permettent le stockage de l'eau des rivières et leur infiltration dans le sol, et les barrages souterrains de stockage des eaux souterraines. L'exploitation et l'utilisation durables des ressources en eau dans la zone concernée n'exigent pas de techniques et d'équipements spéciaux, et peuvent être réalisées à coût relativement bas; des méthodes d'exploitation des eaux souterraines avec gestion et entretien des installations simples sont adaptées. C'est pourquoi ce guide se concentrera sur l'exploitation des eaux de surface par petits barrages et aménagement de mares, et l'exploitation des eaux souterraines par puits, parmi les méthodes de développement des ressources en eau.

On a divisé la zone concernée selon les conditions topographiques et hydrologiques en plaine d'inondation d'oued et pénéplaine éloignée d'un oued, et indiqué les méthodes de développement des ressources en eau applicables pour chacune d'elles dans le Tableau 4.1.2.

Tableau 4.1.2 Division de la zone du Sahel et principales méthodes d'exploitation des ressources en eau

Division	Utilisation des sols et état hydrologique actuel	Principales méthodes de développement des ressources en eau
Plaine d'inondation d'oued	Beaucoup de sols non utilisés. Ecoulement de l'oued pendant la saison des pluies Couche aquifère alluviale et tertiaire Niveau des eaux souterraines relativement peu profond	Petit barrage Puits semi-traditionnels Puits modernes à trou de grand diamètre
Pénéplaine	Agglomérations, terres agricoles et herbages Mares éparpillées dans les cuvettes, stockage d'eau pendant la saison de pluie Couche aquifère du socle. Couche aquifère tertiaire Niveau des eaux souterraines relativement profond	Aménagement de mares Puits modernes à trou de grand diamètre Forages

4.2 Exploitation des eaux de surface par petits barrages

4.2.1 Sélection du site approprié à un petit barrage

Un petit barrage à digue de petit volume, et grande capacité de stockage est économique. C'est pourquoi un relief à partie interruption étroite et bassin de stockage large est approprié à la construction d'un barrage; mais les ondulations étant faibles dans le Sahel, il y a peu d'emplacements remplissant ces conditions. Pour augmenter le volume d'eau stocké, il est possible d'excaver la zone de stockage, mais il arrive qu'alors la couche d'argile difficilement pénétrable proche de la surface soit endommagée et que les fuites d'eau augmentent; c'est pourquoi une étude géologique préalable sera nécessaire.

Le socle sur lequel la digue doit être placée doit être en sol résistant, uniforme à pénétration faible. Mais dans le cas d'un barrage en terre de moins de 10 m, la résistance du sol ne fait pas problème, et l'aspect perméabilité est plus important. Mais il est rare qu'un tel socle affleure près de la surface du sol, et il est souvent couvert de sédiments alluviaux et de sols altérés très perméables. Mais si le socle est plus profond que 10 m, des fuites de la base seront autorisables dans une certaine mesure pour permettre la construction d'un talus en conservant dans une certaine mesure des sédiments accumulés dans le lit de la rivière et la couche altérée.

La digue est faite en terre et roches, et il est essentiel de pouvoir obtenir des matériaux adaptés aux environs.

L'idéal serait que le volume de stockage d'eau efficace du petit barrage soit équilibré par rapport au volume d'eau requis, mais vu les limitations des conditions topographiques du Sahel précitées, les deux coïncident rarement. Dans ce cas, il est souhaitable que le volume de stockage d'eau efficace soit aussi grand que possible, dans les limites de l'écoulement estimées à partir des précipitations et du taux d'écoulement du bassin, en tenant compte de conditions diverses telles que le relief et le droit de propriété des terrains, ainsi que du coût des travaux. Il faudra également étudier la période de stockage possible compte tenu de l'évapotranspiration élevée.

Comme l'érosion des sols pendant la saison de pluie est très forte dans le Sahel, il faudra considérer que la terre/sable charriée du cours supérieur vers le barrage s'accumulera et que cela diminuera le volume de stockage. L'absence de sols à nus en amont et de reliefs d'érosion tels que ravins, et également un élément important pour la sélection du site. Si nécessaire, des travaux anti-érosion des sols pourront être exécutés en amont du barrage,

ce qui assurera la protection des terres agricoles etc. et réduira l'écoulement de terre/sable dans la zone de stockage du barrage.

Par ailleurs, comme le bassin en amont de la digue sera inondé à cause du stockage d'eau, il y aura beaucoup de points à considérer tels que la saisie de l'état d'utilisation des sols, les ajustements avec les propriétaires ou utilisateurs des terres, et le paiement d'indemnités ou la cession de terres de remplacement. De plus, comme le débit sera réduit en aval, il faudra prendre en compte cette influence, y compris les dégâts en cas de rupture éventuelle.

Les zones adaptées seront étudiées sur la base de ces conditions, plusieurs sites seront sélectionnés, et le site du barrage sera fixé après étude des relations avec les zones bénéficiaires.

Les études ci-dessous seront nécessaires pour juger si les conditions ci-dessus sont remplies, étudier les améliorations à apporter etc..

1) Etude topographique

La carte topographique à 1:200.000 et les photos aériennes à 1:50.000 seront étudiées aux premières étapes de l'étude. En général, les rivières ouvertes dans la couche tertiaire (couche de Continental Terminal) forment clairement des vallées, mais les rivières ouvertes dans le socle, granits, roches métamorphiques etc. forment des plaines à pentes douces.

Après sélection par élimination de plusieurs sites candidats, des levés sont faits pour établir une carte topographique. L'échelle de 1:2.000 - 1:5.000 pour toute la zone de stockage d'eau et de 1:100 -1:500 pour la partie site du barrage est jugée convenable. Une étude comparative de la relation entre le niveau d'eau et le volume de stockage, de la relation entre la capacité du barrage et le volume d'eau stockée sera faite pour plusieurs sites candidats pour fixer le site du barrage.

De plus, en cas de développement des terres cultivées en utilisant l'eau stockée dans le barrage comme eau d'irrigation, le site du barrage devra en principe être sélectionné en amont des zones bénéficiaires pour que le coût et le travail de pompage puissent être réduits par amenée de l'eau vers les zones bénéficiaires par écoulement gravitaire de l'eau stockée.

2) Etude géologique

Comme les sédiments alluviaux composés de limon et de sable sont développés pour les grands affluents comme la rivière Goroubi, la résistance du socle est faible et la perméabilité élevée. Il est donc nécessaire de vérifier précisément leur distribution et leur état. Comme les sédiments alluviaux des lits des affluents sont fins, la zone altérée du socle devient l'objet de l'évaluation de la base. La répartition des sédiments alluviaux des lits de rivière et les zones altérées sera estimée par reconnaissance géologique, prospection physique etc. et confirmée par sondage avec sonde à cuiller ou sondage géologique. La perméabilité sera aussi vérifiée par essai d'infiltration (méthode Pitt, etc.)

3) Etude des matériaux

Les sols de couches d'argile alluviales et de zones altérées du socle seront utilisés comme matériau et feront également l'objet de l'étude des matériaux. Leur distribution variant selon les emplacements, ils seront confirmés

par prospection géologique, prospection géophysique et sondages. De plus, il faudra confirmer que l'imperméabilité et la résistance requises pour un barrage sont obtenues après compactage des matériaux. En particulier si le niveau du barrage est relativement élevé, la stabilité du corps du barrage sera importante. Ainsi il faudra collecter des échantillons pour l'étude des matériaux, et étudier la possibilité de leur emploi comme matériau de remblai sur la base du poids spécifique, de la densité, de la teneur en eau naturelle, de la distribution granulométrique, des essais de compactage, des essais de limite d'Atterberg.

Dans le cas d'un barrage d'enrochement, ou de pavage de pierres pour éviter l'érosion de la surface du barrage en terre, de la latérite ou du granit très répandus dans le Sahel et posant peu de problème de dureté sont employés. C'est pourquoi l'étude sur les matériaux rocheux portera plutôt sur la disponibilité à proximité de tas de pierres ayant la granulométrie adéquate.

4) Etude hydrologique

Le volume d'eau stockée sera étudié sur la base du débit annuel des rivières. Si les données de débit ne sont pas disponibles, le calcul du débit sera fait par multiplication des précipitations de l'observatoire voisin par le taux d'écoulement. La méthode ORSTOM et la méthode CIEH indiquées plus loin serviront de référence pour l'estimation du taux d'écoulement.

La plupart des ruptures de barrage sont dues au débordement des eaux d'inondation au-dessus de la couronne du barrage. L'analyse de l'écoulement sera donc nécessaire pour définir le volume d'écoulement des eaux d'inondation de conception de l'évacuateur de crues. Il est courant de concevoir l'évacuateur de crues en se basant sur la crue décennale, mais comme dans le Sahel on dispose de peu de données et que les éléments indéterminés sont nombreux, il vaut mieux prévoir une marge suffisante en se basant sur la crue centennale.

5) Etude sociale

Il faudra vérifier la répartition des habitants, terres agricoles, routes etc., les conditions de propriété et utilisation des sols, les tendances des propriétaires/utilisateurs (possibilités d'obtention d'accord) pour le bassin en amont de la digue qui serait inondé. L'état d'utilisation des eaux du bassin en aval et l'influence du stockage de l'eau dans le barrage seront aussi étudiés.

4.2.2 Définition des spécifications du barrage et conception

La capacité de stockage du barrage est définie par le volume de besoin en eau, les conditions topographiques, les dimensions du talus, le débit des ressources en eau etc.. Un barrage dont la capacité de retenue dépasserait le débit des ressources en eau a de grandes chances de ne pas se remplir et n'est donc pas rentable. A l'inverse, s'il est possible d'assurer une grande capacité de stockage sur le plan topographique, et que cette situation n'est pas assez mise à profit parce que l'étude est insuffisante, on pourrait avoir des regrets par la suite.

C'est pourquoi, avant d'étudier et d'établir des éléments de conception du barrage, des graphes de la relation entre le niveau d'eau et le volume de stockage, la relation entre la capacité du barrage et le volume de stockage, et le niveau d'eau et la surface d'inondation sont établis par les études précitées, pour plusieurs sites, et en comparant les diverses conditions, le site d'installation du barrage le mieux adapté et la profondeur de stockage d'eau seront d'abord définis.

1) Types de petit barrage

Les petits barrages sont des "talus-barrage" construits pour intercepter l'eau ou des espaces découpés pour écouler en sécurité l'écoulement dépassant la capacité de stockage d'eau (dit "évacuation d'eaux d'inondation" ou "talus de radier").

Le relief du Sahel étant relativement doux, le talus-barrage a souvent une hauteur de talus de quelques mètres, et une longueur allant de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. C'est pourquoi la terre facilement disponible sur place est utilisée comme matériau de construction pour la construction du talus-barrage, et le type barrage en terre est généralement adopté. La surface du talus-barrage est souvent protégée par des matériaux en rochers ou en béton pour éviter l'érosion causée par la houle sur l'eau stockée ou les pluies. La partie débordement de type "évacuateur de crues" devra être construite en béton ou gabions pour éviter une érosion incommode du talus par débordement et en aval. La partie débordement du type "évacuateur de crues" est construite en béton ou gabion pour éviter l'érosion due à l'eau débordant.

Fig.4.2.1 Evacuation d'eau du barrage de Mago pendant la saison sèche



gauche: bassin de stockage d'eau
(couverture de béton, talus de protection)
droite: aval (talus de protection en gabion)
Couronne du talus: bétonnée

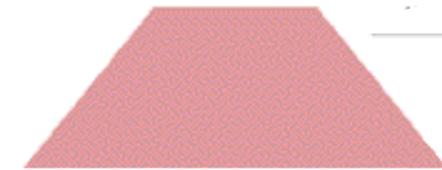
2) Forme de la section transversale du talus

Quand le niveau du talus est grand, la terre à utiliser comme matériau est soumise à des tests, comme précité, pour saisir ses caractéristiques, et la décision est prise après confirmation de la stabilité du talus; mais différents instruments de test et des calculs complexes sont alors nécessaires, et une gestion sévère des travaux est nécessaire pour assurer les fonctions requises.

Mais le talus des petits barrages est généralement peu élevé, quelques m environ, et la couronne est souvent utilisée comme route, c'est pourquoi la section transversale du talus sera un plateau bas, n'exigeant pas de calcul de stabilité précis. Il suffira donc généralement qu'il remplisse les conditions de sécurité ordinaires ci-dessous.

- ① L'inclinaison de la pente du talus sera plus douce que 1:1,5 (inclinaison d'1,5 m à l'horizontale pour 1 m à la verticale) (Figure 4.2.2)

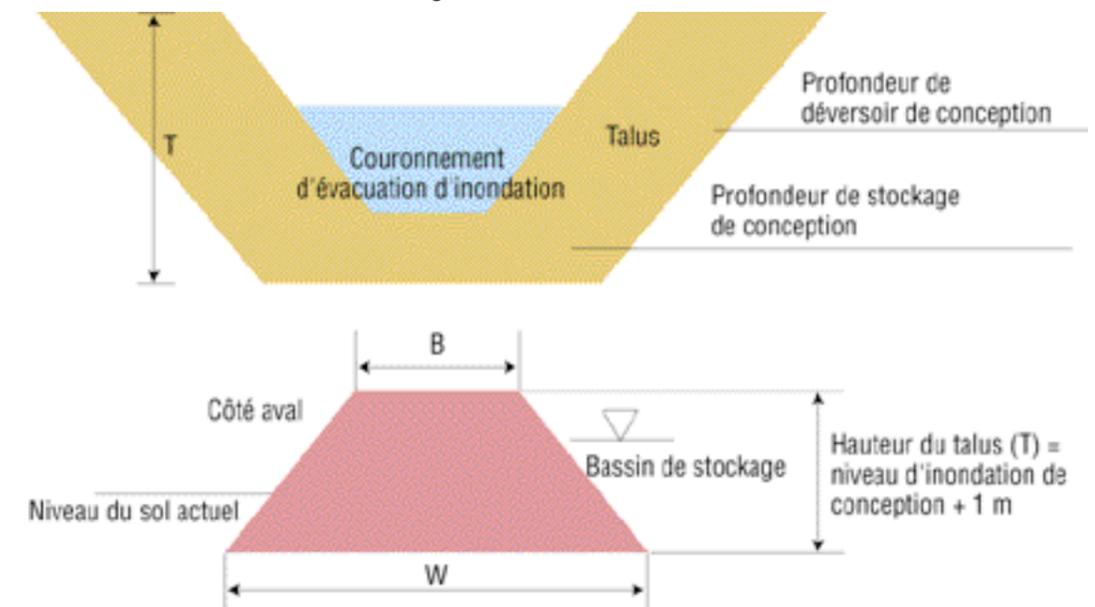
Fig. 4.2.2 Inclinaison de la pente du talus



1 Pour V = 1 m
H = 1,5 m est exprimé 1:1,5
H = 2 m est exprimé 1:2

- ② La hauteur du talus (T) sera d'1 m au-dessus du niveau d'inondation de conception (= profondeur de stockage du projet + profondeur de débordement du projet) pour éviter toute vague ou écoulement de débordement (Figure 4.2.3).

Fig. 4.2.3 Hauteur du talus

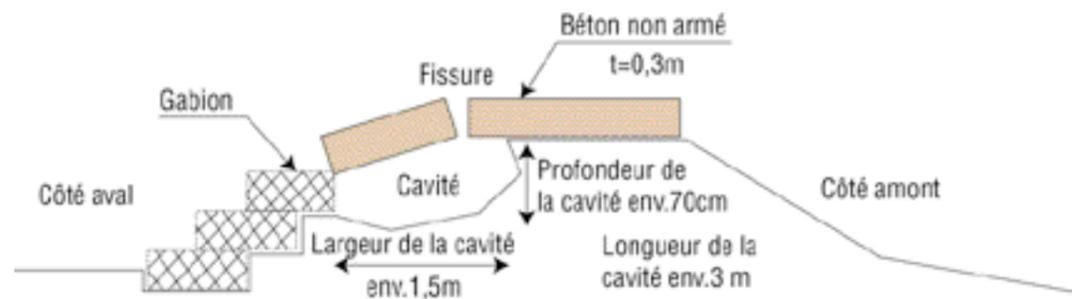


- ③ Comme la largeur de la base du talus (W) sert généralement de la partie supérieure en tant que la route, une largeur suffisante est assurée dans beaucoup de cas, mais elle doit au moins être de 3 à 4 fois de la profondeur de l'eau stockée.
- ④ La largeur de la couronne du talus (B) sera d'environ 2 - 4 m compte tenu de sa hauteur et de son emploi comme route.
- ⑤ Le talus sera construit sur un sol dur, après élimination du sol de surface.

⑥ Pour les travaux de construction du talus, l'épaisseur d'élimination par couche de sol sera moins de 30 cm, et le compactage sera fait par plus de 3 aller-retour d'engin lourd tel que bulldozer.

⑦ Le matériau de remblai sera du matériau sans mélange de roches de plus de 20 cm de diamètre. Si beaucoup de grosses roches sont intégrées, le compactage sera insuffisant, et des interstices peuvent apparaître dans le talus. Si cette eau y pénètre, l'intérieur du talus sera érodé, ce qui peut mener à sa rupture. La Figure 4.2.4 donne un exemple d'érosion de l'intérieur du talus par infiltration d'eau.

Fig. 4.2.4 Etat d'érosion de l'intérieur du talus par infiltration d'eau à l'ouverture d'inondation de Mago



⑧ Si la surface de l'évacuateur de crues est recouverte de dalles béton, il faudra insérer des armatures à l'intérieur, ou bien assurer une épaisseur de béton de plus de 20 cm pour éviter toute fissure. Il est souhaitable d'enterrer des courroies en caoutchouc pour éviter la pénétration d'eau aux jonctions entre les dalles de béton voisines.

3) Taille de l'évacuateur de crues

L'évacuateur de crues (largeur de débordement (L) et profondeur de débordement de conception (R)) devra être d'une taille permettant l'écoulement stable du volume d'inondation de conception (Q) calculé par analyse du volume d'écoulement ci-après.

Si la profondeur de débordement est faible, la largeur de débordement devient grande et la plage à protéger par du béton ou gabion grandit, et inversement, si la profondeur de débordement est grande, la largeur de débordement est petite, la hauteur du talus augmente.

Ci-dessous les formules de calcul de taille de l'évacuateur de crues adopté pour le barrage de Mago, installé par la JGRC au village de Magou, Niger.

$$L=Q/\{\mu \cdot h^{3/2} (2g)^{1/2}\} \quad \text{unité :m}$$

μ : Coefficient de forme de la section transversale (0,35 en cas du barrage de Mago)

$$h: \text{Profondeur de débordement} \quad h=\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{F}}{3}$$

F: Distance de dégagement (km)

g: Taux d'accélération gravitationnelle (9,8)

$$R=A \cdot (h+V^2/2g) \quad \text{unité: m}$$

A: Coefficient de sécurité (1 en cas du barrage de Mago)

$$V: \text{Vitesse de transmission de l'onde} \quad V=\frac{3}{2} + \frac{2h}{3}$$

Source: Manuel du technicien du génie rural (Travaux sur un périmètre d'irrigation)

SOGREAH: Société grenobloise d'études et d'applications hydrauliques

Fig. 4.2.5 Ecoulement d'eau débordant l'évacuateur de crues



4) Calcul du volume d'écoulement

Le calcul du volume d'écoulement répond à un double objectif: concevoir l'évacuateur de crues d'une taille adaptée sur estimation du volume d'inondation de conception, et vérifier si un écoulement permettant d'assurer le volume de stockage sera obtenu.

Le volume d'inondation de conception est calculé sur la base des précipitations à probabilité décennale généralement jugées d'une haute précision statistique, mais le résultat étant toujours une estimation, il ne faut pas oublier que si divers paramètres ne sont pas correctement appliqués en fonction des particularités locales, des erreurs énormes sont possibles.

La méthode de l'ORSTOM et la méthode CIEH (Puech & Chabi-Gonni, 1984) sont souvent utilisés dans le Sahel pour l'estimation des précipitations à probabilité décennale. La première est applicable seulement à un bassin d'une surface de 1 à 120 km². La seconde est utilisable pour un bassin de plus grande surface à précipitations annuelles jusqu'à 2.000 mm, mais elle n'est pas utilisable pour une surface de base de plus de 2.000 km². Les auteurs de cette méthode de calcul ont établi un nomographe jusqu'à 1.000 km² maximum.

Différents coefficients et valeurs doivent être définis pour l'utilisation de ces méthodes d'estimation:

① Surface de collecte des précipitations s'écoulant à l'emplacement du barrage (surface de collecte: S km)

② La valeur de la différence (ΔH m) entre l'élévation où 5% de la surface de collecte dépasse cela et

l'élévation où 5% de la surface de collecte est inférieure à cela, moins la longueur (L km) du rectangle de même surface obtenu par la formule ci-dessous (indice d'inclinaison total: Ig)

$$L = \frac{I_{comp} \cdot S}{1,12} \times \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{I_{comp}} \right)^2} \right) \quad I_{comp} = 0,28 \times \sqrt{\frac{P}{S}}$$

I_{comp} : Indice de compacité (sans unité)

P : Périmètre stylisé du bassin en km

- ③ Coefficient d'écoulement indiquant le pourcentage de l'écoulement de surface dans les précipitations (taux d'écoulement %)
- ④ Indice d'infiltration indiquant l'importance de la pénétration des eaux de pluie dans le sol
- ⑤ Indice d'ondulation indiquant l'influence du relief sur l'écoulement

Pour les conditions d'applications et méthodes de calcul concrètes, se reporter aux livres de référence concernant la conception des petits barrages largement utilisés en Afrique occidentale. Consulter "Le Point sur la maîtrise des crues dans les bas-fonds - Petits et microbarrages en Afrique de l'ouest, Sylvain BERTON, 1988".

Le coefficient d'écoulement à probabilité décennale appliqué initialement à la conception du barrage de Mago était incorrect, ce qui a mené à la dure expérience de la rupture du talus. Mais heureusement, il n'y a pas eu de victimes ni de dégâts importants pour les terres agricoles en aval; après cet accident, la JGRC a revu sa conception, et a fait des travaux de réhabilitation de la portée requise, mais qui ont occasionné un coût élevé. Cet exemple est donné, à titre d'avertissement, pour les petits barrages à construire dans l'avenir.

La raison de l'accident est l'utilisation incorrecte des différents coefficients de volume d'écoulement maximum en probabilité décennale et des coefficients d'écoulement utilisés pour la conception initiale et la conception modifiée, qui ont donné lieu à une différence de volume d'écoulement deux fois plus grande comme indiqué ci-dessous.

Volume d'écoulement maximum en probabilité décennale (Q_{10}) = $a \times S^b \times I_g^c \times Kr_{10}^d$ (méthode de CIEH)

Conception initiale:

Coefficients: $a=0,0888$, $b=0,696$, $c=0,953$, $d=0,534$

Indice d'inclinaison générale (I_g) = 3

Coefficients d'écoulement (Kr)=14,13%

$Q_{10}=40m^3/s$

Conception modifiée:

Coefficients: $a=0,560$, $b=0,619$, $c=0,279$, $d=0,510$

Indice d'inclinaison générale (I_g) = 3

Coefficients d'écoulement (Kr)=36,4%

$Q_{10}=130m^3/s$

(Référence) Caractéristiques du barrage de Mago

① Volume de stockage env.	85.000m ³	
② Surface de stockage	15,32ha	
③ Forme	Talus: Barrage en terre de type uniforme (couverture de roches de la pente) Déversoir : Evacuateur de crues en béton armé de type déversoir (également pour la route)	
④ Longueur de la couronne	289m	
⑤ Hauteur du talus	4,86m	
⑥ Largeur de la couronne	6m	
⑦ Pente du talus	Amont: 1:2,5 Aval 1:2,0	
⑧ Précipitations annuelles moyennes	567m	
⑨ Précipitations journalières à probabilité décennale	86m	
⑩ Volume d'inondation de conception	40m ³ /s (110m ³ /s) [130m ³ /s]	
⑪ Surface du bassin	205km ²	
⑫ Circonférence du bassin	58km	
⑬ Volume annuel total de l'écoulement	8.200.000m ³	
⑭ Volume annuel de sable accumulé de conception	1.400m ³	
⑮ Longueur de débordement	45m	[+80m]
⑯ Profondeur d'eau de débordement	0,7m	[1,0m]
⑰ Marge en hauteur	0,6m	[0,9m]
⑱ Elévation du couronnement	6m	
⑲ Elévation du couronnement	209,3m	[210,0m]
⑳ Elévation du déversoir	208,1m (209,45m)	
㉑ Hauteur du socle	204,44m	[204,42m]
㉒ Coût des travaux	72 millions FCFA	

* () indique la valeur observée lors des dégâts dus aux précipitations le 1er juillet 1998, [] la nouvelle valeur de conception des travaux de réhabilitation.

Fig. 4.2.6 Sotie d'évacuation du barrage de Mago vue de l'aval



4.2.3 Période d'exécution

Pour l'exécution des travaux de la digue, comme les structures en cours de construction peuvent être endommagées par l'écoulement des rivières pendant les saisons pluviales, une structure capable de résister à l'écoulement de la rivière doit être achevée pour la fin de la saison sèche.

Comme les travaux auront lieu pendant la saison sèche, il faudra faire en sorte que la terre servant de matériau ne soit pas trop sèche en garantissant bien l'exécution de manière à assurer la densité de compactage nécessaire, aussi proche que possible de la teneur en eau idéale.

4.2.4 Gestion et maintenance des installations

En cas de rupture éventuelle du barrage, non seulement les ressources en eau seront perdues, mais l'inondation peut aussi provoquer des dégâts en aval. C'est pourquoi la gestion du talus devra être assurée après sa construction.

Si le barrage n'est pas construit sur un bon socle, ou bien si les travaux d'exécution ont été inadaptés, il arrive que d'énormes fuites apparaissent. Ces fuites non seulement réduisent l'eau stockée, mais peuvent provoquer le phénomène du renard et rompre le barrage.

Dans la zone concernée, beaucoup de rivières provoquent des inondations à cause des pluies violentes. En cas de débordement d'un talus d'un barrage en terre, une rupture du talus peut facilement survenir. C'est pourquoi la construction d'une sortie d'inondation de taille adaptée et un talus à structure de résistance suffisante, et la protection suffisante de la partie passage d'eau et de ses environs seront requises.

Il arrive souvent que le talus soit soumis à l'érosion suite à l'impact et à la houle au moment de l'inondation. Il est donc de toute importance de construire un talus possédant une résistance suffisante, mais aussi d'effectuer une gestion-maintenance appropriée, en réparant en particulier les dommages dus à l'érosion. En cas de découverte de fuites d'eau anormales ou de fissures du talus, le talus doit immédiatement être réparé.

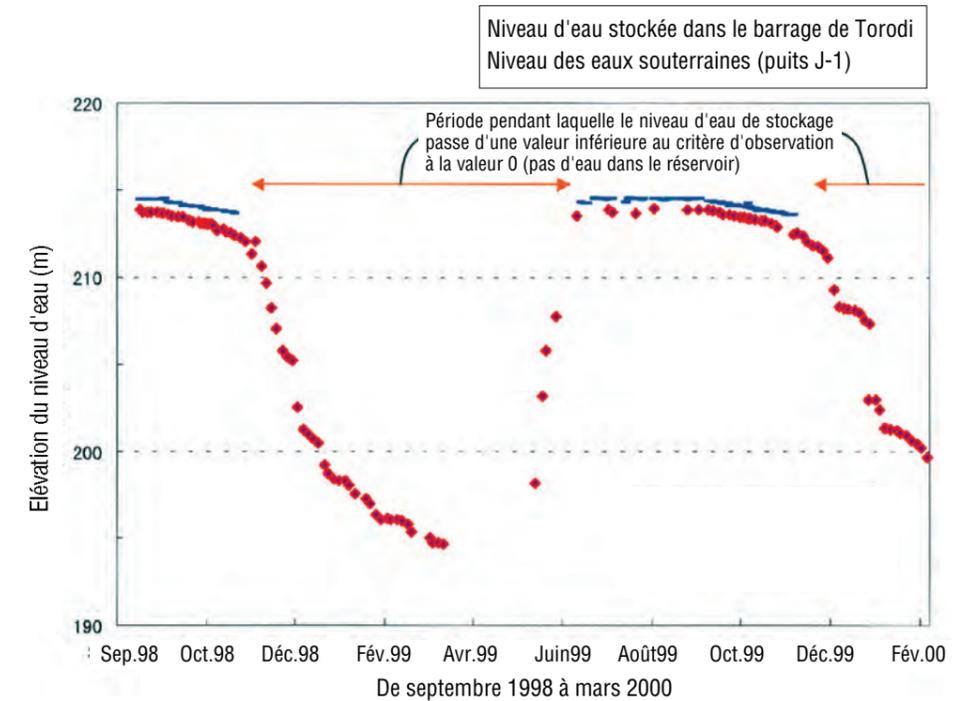
4.2.5 Exploitation des eaux souterraines aux environs d'un barrage

Les eaux stockées dans les petits barrages construits dans la plaine d'inondation d'un oued sont directement utilisées; mais ces barrages sont aussi source de recharge des eaux souterraines, et laissent espérer une augmentation des eaux souterraines utilisables pendant la saison sèche etc..

Voici un exemple d'augmentation du volume de recharge des eaux souterraines par petit barrage. Dans le barrage de Torodi construit à titre expérimental au Niger, le coefficient de perméabilité de la couche supérieure de la zone de stockage d'eau est de $1 \times 10^{-4} - 10^{-5}$ cm/s environ, la zone altérée des granits qui forment la couche aquifère est d'environ 4 m d'épaisseur, et son coefficient de perméabilité est de 1×10^{-3} cm/s. L'augmentation du niveau des eaux souterraines à partir des eaux stockées dans le barrage a été vérifiée à partir d'un puits dans la zone de stockage et des trous d'observation des eaux souterraines des environs. Comme le montre la Figure 4.2.7, une recharge souterraine d'environ 7 mm/jour a été vérifiée à partir de la modification du niveau de l'eau stockée et de l'évapotranspiration mesurée. Par conséquent, cela fait une recharge des eaux souterraines d'environ 1.400 m³ par jour (surface de la zone de stockage \times volume de recharge = 200.000 \times 0,007) à partir de toute la zone de stockage. Ce volume correspond à 1,2% du volume de stockage du barrage. Mais comme les eaux rechargées sont distribuées dans toute la zone aux environs, le volume collectable par puits n'en constitue qu'une partie.

On peut alors penser à installer des puits aux environs de la zone de stockage du petit barrage ou dans la zone de stockage pour utiliser les eaux souterraines. Les eaux souterraines sont surtout des sources d'alimentation en eau précieuses de la moitié à la fin de la saison sèche où l'eau stockée se tarit.

Fig. 4.2.7 Niveau d'eau stockée dans le barrage de Torodi, Niger, et niveau des eaux souterraines des environs.



4.3 Développement des ressources en eau par aménagement des mares

4.3.1 Aménagement des mares

L'exploitation des ressources en eau par aménagement des mares consiste à augmenter et assurer un volume d'eau stockée par réhabilitation de mares existantes ou bien création de nouveaux bassins, et à stocker le plus longtemps possible les eaux de surface.

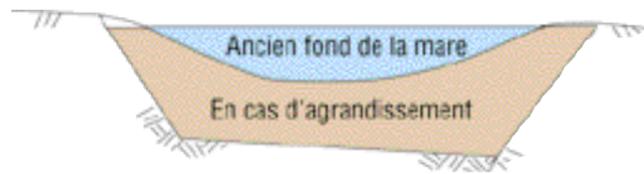
4.3.2 Méthode d'aménagement des mares

Le surcreusement de mares, l'agrandissement par creusement du pourtour des mares et la construction de talus peuvent être cités comme méthodes d'aménagement des mares. Parmi ces méthodes, celle la mieux adaptée sera sélectionnée à partir des résultats de l'étude sur place; voici ci-dessous les particularités de chaque méthode et les conditions d'application générales.

1) Surcreusement du sol

Si le sol du fond de la mare est d'une dureté qui permet de le creuser facilement, et que le sol après creusement soit difficilement perméable, en surcreusant le fond de la mare, il est possible d'augmenter le volume de stockage d'eau (Figure 4.3.1).

Fig. 4.3.1 Surcreusement du sol du fond de la mare



Si le fond de la mare est en roche dure, le creusement sera difficile ou très coûteux; il faudra donc préalablement vérifier l'état géologique du fond par prospection par ondes sismiques ou sondage avec sonde à cuiller. Si la terre excavée est répandue aux environs de la mare, il s'écoulera dans la mare sous l'effet des pluies et réduira la capacité de la mare; il faudra donc envisager le traitement de la terre excavée.

Le fond de la mare devra être nivelé pour qu'il ne reste pas de grandes inégalités; il faudra faire en sorte que l'eau se collecte à un emplacement au moment des basses eaux. Le creusement du fond de la mare peut éliminer la couche difficilement pénétrable, dans ce cas augmenter l'infiltration à partir du fond. Si la perméabilité du sol après creusement est élevée, il faudra étudier des mesures pour améliorer l'arrêt de l'eau par exemple le broyage, le brassage, le compactage etc. avec un engin lourd.

Fig. 4.3.2 Aménagement de mare par creusement du fond



(Mare Eda du village de Magou, Niger)

Principaux objectifs: Assurer un lieu d'abreuvement pour le bétail

Taille de la mare: 40 m x 100 m

Volume de stockage: 3.800 m³

Profondeur de surcreusement: 1,2 m

Inclinaison des pentes: 1: 5

Méthode d'exécution: Contractant

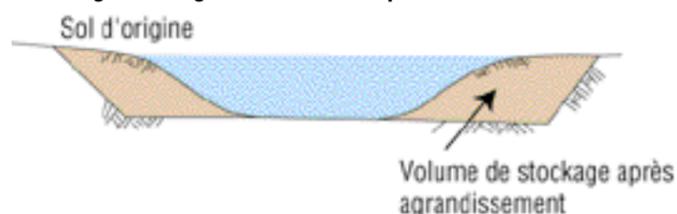
Coût des travaux: 1,76 million FCFA

* Nouvelle construction sur la terre nue à proximité pour sauvegarder l'écosystème de la mare existante

2) Agrandissement du pourtour

Quand le sol du fond de la mare est dur et difficile à creuser suffisamment, le pourtour de la mare sera agrandi. Mais seulement si les terrains nécessaires à l'agrandissement sont disponibles aux environs et si l'élimination des déblais est possible. La combinaison avec la méthode 1) précitée est aussi possible.

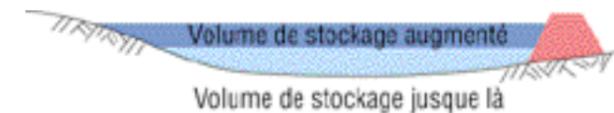
Fig. 4.3.3 Agrandissement du pourtour de la mare



3) Construction d'une digue

Si le sol du fond de la mare est dur et difficile à creuser, ou bien qu'un coût énorme est prévu, que l'agrandissement aux environs est impossible, cette méthode peut être combinée avec les méthodes 1) et 2) (Figure 4.3.4). Autrement dit, il sera économique et profitable d'utiliser la terre excavée comme matériau pour la digue. La figure 4.3.5 présente un exemple de la construction d'une digue. La hauteur du niveau d'eau de stockage sera plafonnée à la hauteur du sol de la zone d'écoulement d'arrière-plan.

Fig. 4.3.4 Construction d'une digue



Quand on construit une digue, il faut tenir compte des risques de rupture due à un débordement trop important. Il faut donc mettre en place un déversoir d'une taille appropriée permettant de résister à un écoulement important.

Consulter "4.2.2 Définition des spécifications du barrage et conception, 2) Forme de la section transversale du talus" pour la taille de la digue et la coupe transversale de conception.

Fig. 4.3.5 Aménagement de mare par surcreusement du fond et construction de digue



(Mare de Koba, Ségou, Mali)

Taille de la mare: 80 m x 150 m

Capacité de la mare: 10.000 m³

Profondeur de creusement: 0,7 m

Hauteur de la digue: 1,5 m, longueur: 360 m

Largeur de la couronne: 5 m

Inclinaison de la pente: 1:1,5

Méthode d'exécution: Contractant

Coût des travaux: 12,5 millions FCFA

4.3.3 Sélection du site adapté

1) Définition de la portée de l'étude

En cas d'aménagement de mare, il faudra mettre l'accent sur les avantages du site de la source d'eau ou bien l'importance du volume de développement pour définir la portée de l'étude pour la sélection du site. Autrement dit, il est idéal d'aménager une mare de grande capacité à un emplacement pratique du point de l'utilisation, mais ces deux conditions ne sont pas toujours satisfaites pour des raisons topographiques etc.. Pour cette raison, l'orientation de base pour l'aménagement: aménager une mare pratique du point de vue de l'utilisation, même si elle est de petite capacité, ou bien assurer le volume d'eau suffisant pour l'exploitation même si le site est un peu éloigné et peu pratique, devra être définie sur la base du souhait des habitants utilisateurs.

2) Etude des sites candidats à l'aménagement de mares

Dans la zone concernée, il faudra sélectionner des mares candidates à l'aménagement après une étude de l'emplacement et de la taille des mares existantes, de la surface des bassins en arrière-plan et du volume d'écoulement, de la nature du sol etc.. Il est aussi nécessaire de saisir les conditions d'utilisation actuelles, les souhaits de réaménagement des habitants et leur volonté d'exploiter les ressources en eau. Ou bien si l'aménagement d'une mare est jugé difficile suite à l'étude, on pourra étudier similairement les conditions naturelles d'emplacements où se collectent les eaux de pluie s'écoulant comme les bas-fonds, les chenaux d'eau etc., qui pourraient être candidats à l'aménagement de nouvelles mares. Le respect de l'habitat des êtres vivants et de la végétation des environs devra être assuré.

Si le développement de potagers etc. est réalisé en même temps que l'aménagement d'une mare, si la distance entre les champs et la source d'eau est importante, le travail de puisage et de transport de l'eau deviendront importants, ou bien le coût de la mise en place d'installations d'amenée et distribution d'eau sera élevé; il faudra donc vérifier les possibilités d'acquisition de terres pour les cultures irriguées aux environs de la mare.

3) Etude technique pour l'aménagement de mares

Une étude topographique et géologique etc. détaillée sera faite pour les mares et sites candidats à l'aménagement suite à l'étude sur place, pour vérifier la faisabilité concrète de l'aménagement.

La saisie du degré de dureté du sol et de sa perméabilité, de la profondeur de la couche par étude géologique par tarière etc. servira de référence pour la sélection de la méthode adaptée parmi les méthodes d'aménagement existantes.

De plus, la surface du bassin et le volume d'écoulement au point de la mare seront confirmés sur la carte horizontale du bassin et sur la base des données d'observation climatique.

4) Vérification de la disponibilité de matériau pour le génie civil

Les matériaux requis diffèrent selon les méthodes d'aménagement des mares, et les éléments suivants devront être confirmés.

- ① En cas de l'installation de digue, des matériaux adaptés au remblai sont-ils disponibles aux environs, la terre obtenue par creusement du fond de la mare y compris?
- ② Si des matériaux en roches sont utilisés en tant que matériau de protection des chemins de pâturage du bétail et des pentes, et de la partie débordement, est-il possible d'obtenir assez de matériaux en roches aux environs ?
- ③ Si l'élimination de la terre excavée du fond de la mare est nécessaire, sera-t-il possible de trouver une décharge n'ayant pas une mauvaise influence sur les terres agricoles ou mares des environs?
- ④ La collecte de matériaux du remblai n'aura-t-elle pas une mauvaise influence sur l'environnement naturel?

4.3.4 Profondeur de stockage d'eau de mares

Les eaux stockées d'une mare sont utilisées pour l'alimentation en eau du bétail ou comme eau d'irrigation, mais une quantité importante est aussi perdue par évapotranspiration de la surface + infiltration dans le sol. C'est pourquoi ces volumes perdus doivent aussi être pris en compte dans la capacité de stockage.

Ces volumes variant selon les conditions géologiques et climatiques, il est souhaitable de mesurer le coefficient de perméabilité du sol et l'évapotranspiration saisonnière. Les résultats d'observation de la JGRC ont montré que le volume perdu faisait un total d'environ 10 à 15 mm/jour¹⁾. Aussi [10 - 15 mm/jour × nombre de jours de stockage de conception] servira de critère pour rechercher approximativement la profondeur de stockage nécessaire. De plus, [profondeur de la mare ÷ 10 - 15 mm/jour] permet d'obtenir le nombre approximatif de jours de stockage.

La perte par évapotranspiration de surface est obtenue par [surface supérieure du plan d'eau × vitesse d'évaporation], et la perte par infiltration dans le sol par [surface de la pente du sol au contact de l'eau stockée × vitesse d'infiltration], mais l'emploi de [surface de la pente du sol ÷ surface de la surface du plan d'eau] plus pratique, ne fait pas de grande différence.

¹⁾ ① Etude pour le développement des techniques de lutte contre la désertification (JGRC, rapport de 1997)

Lieu d'observation: Village de Magou, Niger

Période d'observation	Vitesse d'évaporation	Vitesse d'infiltration
Oct. à déc. 95	6,0 mm/jour	8,5 mm/jour
Juin. à sep. 97	5,1-6,9 mm/jour	-
Oct. à nov. 97	8,9 mm/jour	7,5 mm/jour

② Etude pour la mise en place d'une ferme pilote modèle pour les mesures de lutte contre la désertification (Agence de l'environnement, rapport de 1999)

Lieu d'observation: Village de Naré, Burkina Faso

Valeur mensuelle moyenne de l'évaporation 94-96:

Septembre: 162,6 mm (5,4 mm/jour), octobre: 230,1 mm (7,4 mm/jour)

4.3.5 Calcul du volume de stockage d'une mare

Le volume de stockage d'eau d'une mare a été calculé en tenant compte du relief adapté et de la méthode à appliquer définis sur la base de l'étude sur place. Et la période de stockage a été calculée à partir de la relation entre la profondeur d'eau de la mare et le volume de stockage.

4.3.6 Installation d'une sortie d'inondation

Les zones d'écoulement vers la mare varient selon les conditions topographiques, mais elles sont souvent relativement petites, de quelques km². Mais les pluies dans la zone du Sahel ont un taux d'écoulement élevé, et arrivant à l'emplacement de la mare en peu de temps, elles dépassent temporairement la capacité de stockage de la mare. L'écoulement dépassant la capacité de stockage de la mare déborde sur le pourtour de la mare. A ce moment-là, il n'y a pas de problème si la différence entre le niveau d'eau existant et le niveau d'eau après aménagement est faible. Mais si le niveau d'eau de la mare est relevé par installation d'une digue, il y a risque de rupture de la digue par débordement sur la couronne, et dans ce cas, en plus de la perte de l'installation, des accidents imprévus comme la perte par écoulement de terres agricoles en aval et blessures des habitants.

C'est pourquoi une sortie d'inondation doit être installée sur une partie de la digue si l'aménagement de la mare se fait par digue. Selon la hauteur de la digue et l'importance de l'écoulement, cette structure peut sans problème être en dalles de béton ou gabion ou même simplement alignement de pierres dans quelques situations.

Voir le paragraphe concernant la taille de la sortie d'inondation, "4.2.2 Définition des spécifications du

4.3.7 Exploitation des eaux souterraines aux environs d'une mare

Comme pour le petit barrage, beaucoup des eaux souterraines aux environs des mares sont relativement abondantes et à niveau d'eau relativement peu profond à cause de la pénétration dans le sol à partir de la mare. Cela permet d'installer les puits aux environs des mares et d'exploiter les eaux souterraines. L'utilisation combinée: utilisation de l'eau stockée quand de l'eau est stockée dans la mare et de l'eau souterraine quand la mare est à sec est efficace.

4.4 Exploitation des eaux souterraines par puits

Compte tenu des objectifs d'utilisation (eau potable, irrigation, bétail etc.), le type de puits le plus économique et efficace pour le pompage des eaux souterraines sera sélectionné pour la couche aquifère saisie lors de l'étude sur place. De plus des puits seront installés sans gêner les puits existants.

Outre l'assurance du volume, l'assurance de la qualité de l'eau du puits est aussi essentielle. La réhabilitation des puits traditionnels, par installation d'un tubage en béton et l'empêchement de la pénétration d'eaux sales de surface dans le trou par amélioration de la structure au sol du puits, permettent d'assurer le volume d'eau et l'amélioration de sa qualité.

Le volume exploitable des eaux souterraines et la profondeur nécessaire du puits varient selon les emplacements, la distance depuis la source de recharge des eaux souterraines, rivière par exemple, l'état de la couche aquifère etc.. Par exemple, comme le montre le Tableau 3.4.4, le volume d'eau pompable par puits dans une couche aquifère du socle est beaucoup plus faible que celui pompable dans une couche alluviale. C'est pourquoi l'état de la couche aquifère doit être saisi par étude de la situation actuelle et les possibilités d'obtenir de volume d'eau nécessaires étudiées, lors de l'établissement d'un projet d'exploitation des eaux souterraines.

Par ailleurs, si un socle difficilement pénétrable est réparti en forme de vallée au-dessous d'une couche aquifère alluviale etc., l'exploitation des eaux souterraines est possible par barrages souterrain. Mais pour l'établissement du projet, il faudra mettre au clair si la construction d'un barrage souterrain sera efficace par saisie de l'état hydrogéologique et du bilan hydrologique de la zone concernée.

4.4.1 Sélection de l'emplacement du puits

Pour l'exploitation de l'eau sous forme de nappe dans la plaine d'inondation d'un oued etc., le volume d'eau souterraine pompable est influencé par la profondeur du socle (couche aquifère). Autrement dit, il est possible d'obtenir un volume relativement important d'eau souterraine à un emplacement où le socle est profond et la couche aquifère épaisse. Par contre, à un emplacement où le socle est peu profond, le volume d'eau souterraine sera limité ou bien les puits seront vides. La surface supérieure du socle est parfois très irrégulière, avec des profondeurs de plus de 20 m, mais aussi des emplacements peu profonds de 2 à 3 m. Comme le montre la Figure 4.4.1, des granits du socle affleurent par endroits dans la plaine d'inondation de l'oued composé de couches alluviales accumulées.

Fig. 4.4.1 Affleurements du socle (granits) dans la plaine d'inondation



Pour obtenir de l'eau souterraine à coup sûr, l'estimation préalable de la profondeur du socle, et la sélection des emplacements adaptés pour les puits sont nécessaires. Le sondage d'étude est la méthode la plus sûre pour estimer la profondeur du socle. Mais le forage avec une sondeuse est onéreux et difficilement praticable. De plus, comme le creusement manuel par sonde à cuiller est possible jusqu'à environ 9 m, son application est limitée. C'est pourquoi la prospection géophysique, qui estime la structure géologique par mesure des caractéristiques du socle à partir de la surface, est la méthode la moins chère et la plus facilement praticable. La prospection par ondes sismiques est efficace pour saisir avec précision la structure géologique à profondeur relativement faible, et la prospection électrique pour les structures géologiques profondes.

Par ailleurs pour l'exploitation de l'eau des fissures, la saisie de la structure de la faille ou des plis, et des emplacements où les fissures ou parties broyées du socle sont développées, est nécessaire.

L'étude du linéament par interprétation de photos aérienne est faite dans ce but.

Un puits sera installé à un emplacement où la meilleure couche aquifère possible sera répandue, conformément à l'étude ci-dessus, mais il faudra aussi prendre en compte la relation positionnelle avec la zone bénéficiaire. Dans le cas de l'eau potable, il est souhaitable que le puits soit installé le plus près possible de l'agglomération pour réduire le pénible travail du transport d'eau. Pour l'eau d'irrigation, l'eau peut être amenée à la zone d'irrigation par canaux, mais vu le coût de l'aménagement des canaux et de leur maintenance, et les pertes d'eau pendant l'envoi, il est souvent souhaitable que le puits soit placé à proximité de la zone à irriguer.

De plus, et particulièrement pour les puits d'eau potable, il est souhaitable afin d'éviter la pollution par bactéries et parasites de les placer en amont des sources de pollution (fosses à ordures, fosses à matières polluantes etc.) (en tenant compte aussi des courbes de niveau des eaux souterraines), et de les éloigner d'au moins 30 m de ces sources de pollution.

A l'installation d'un nouveau puits, si la concurrence avec les puits existants doit être évitée, il faudra placer le nouveau puits à bonne distance des puits existants, compte tenu de la portée d'influence des puits.

4.4.2 Sélection de la structure du puits

1) Type de puits

① Des puits artésiens, ② puits traditionnels et ③ puits modernes sont généralement utilisés comme installation de collecte de l'eau souterraine dans le Sahel. Le puits traditionnel est un puits à trou creusé

manuellement protégé par des pierres ou du bois.

Le puits moderne est un puits à trou de grand diamètre avec tubage en béton armé d'environ 1,8 m de diamètre (puits moderne), ou bien un forage d'environ 0,15 m de diamètre. La limite de creusement des puits modernes à grand diamètre varie selon la profondeur du niveau des eaux souterraines, mais est environ de 40 à 50 m au maximum, alors que pour les forages, une profondeur plus grande est possible. Un puits moderne à coupe transversale importante est avantageux pour le volume d'eau pompable, mais le volume pompé n'est pas proportionnel au diamètre du puits. Les puits modernes à grand diamètre, permettent un puisage bon marché parseau de puits, mais une pompe séparée doit être installée sur les forages, qui exige des frais de maintenance. Le coût d'installation d'un puits au Niger est de 250.000-400.000 F CFA/m pour un puits moderne, et de 80.000-130.000 F CFA/m pour un sondage. Par conséquent, pour une même profondeur, le forage est moins cher.

La Figure 4.4.2 montre l'état de la mise en place des puits modernes à grand diamètre.

Fig. 4.4.2 Etat de la mise en place Puits modernes à grand diamètre



Si le niveau d'eau souterraine est relativement peu profond, moins de 10 m, il est possible d'installer un puits en utilisant une buse en métal ondulé comme tubage (puits semi-traditionnel). Le creusement manuel est possible si ce n'est pas le socle dur, aucun équipement spécial n'est requis. En cas de réutilisation de tuyaux ondulés mis au rebut, l'installation est relativement bon marché, et revient à 400 à 600.000 F CFA/puits pour un puits semi-traditionnel de 7 m de profondeur.

La Figure. 4.4.3 montre un exemple de puits semi-traditionnel utilisant une buse en métal ondulé.

Fig. 4.4.3 Puits semi-traditionnel utilisant des buses métalliques (diamètre: 1 m)



Ces puits ont des caractéristiques selon leur type, et le type adapté devra être sélectionné en tenant compte de l'état de la couche aquifère, du niveau des eaux souterraines, des objectifs d'emploi, du volume et de la méthode de pompage, et du budget etc.. Le type de puits à nouvellement installer devra être sélectionné parmi les puits modernes à grand diamètre, forages et puits semi-traditionnels en tenant compte de leur résistance etc. En général, un puits moderne est avantageux pour une couche aquifère peu profonde, et un forage pour une couche aquifère profonde. Et le puits semi-traditionnel est économique comme puits pour l'irrigation parce qu'il est placé sur une couche aquifère peu profonde et que la qualité de l'eau n'est pas prise en compte.

Si la couche aquifère se situe à un bon emplacement, un puits simple creusé par sonde à cuiller de 6-7 m de profondeur et à trou de 150 mm environ, avec tubage en PVC peut servir de source d'eau temporaire ou d'urgence. A la ferme pilote de Magou, 18 m³ /h environ sont pompés d'un trou creusé par sonde à cuiller.

Il y a peu d'exemples au Sahel, mais un puits de collecte est un puits creusé par réfraction à trou latéral à partir d'un puits de grand diamètre, ayant les mêmes effets qu'un puits de grand diamètre, mais qui permet de pomper de grands volumes même si la couche aquifère est mince. De plus, la probabilité de toucher une fissure dans le socle avec le trou latéral est forte, ce type est aussi efficace pour la zone du socle (Wright et al., 1987). Mais le problème est son coût élevé parce que la construction exige un équipement spécial.

Les Figures 4.4.4 et 5 montrent des exemples d'exécution typiques de puits moderne et semi-traditionnel. Le Tableau 4.4.1 résume la structure de puits selon leur type.

Fig. 4.4.4 Exemple de structure de puits moderne à trou de grand diamètre (Clark, 1988)

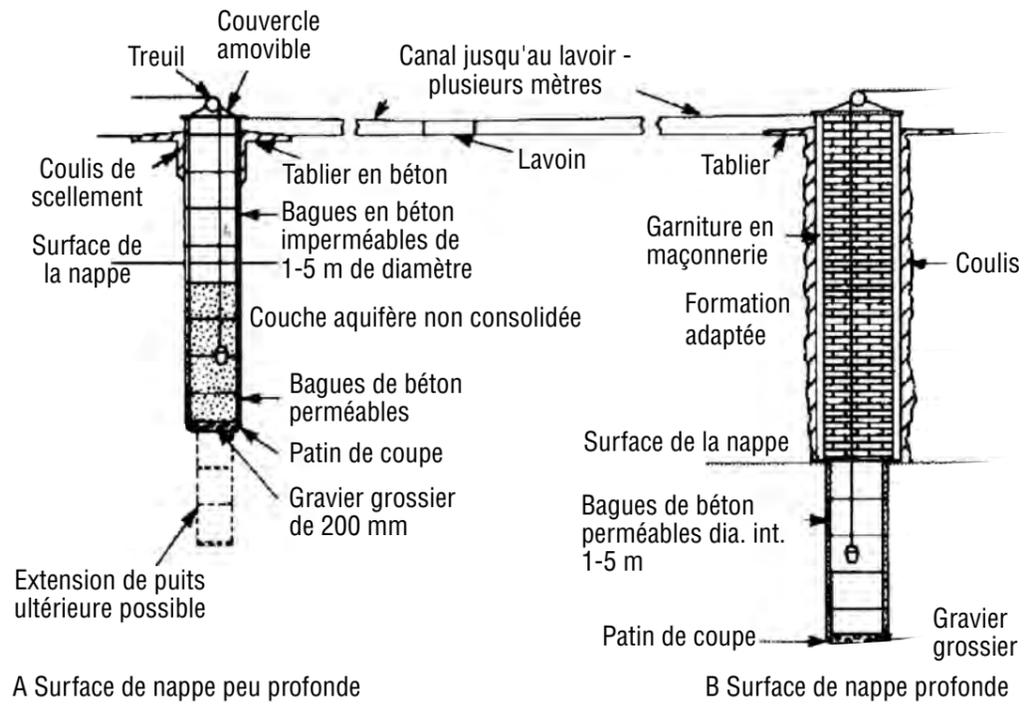


Fig. 4.4.5 Structure d'un puits semi-traditionnel

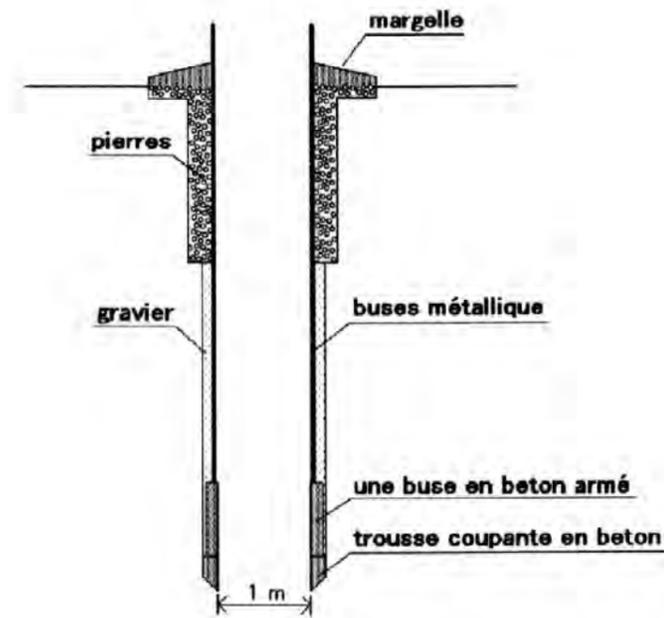
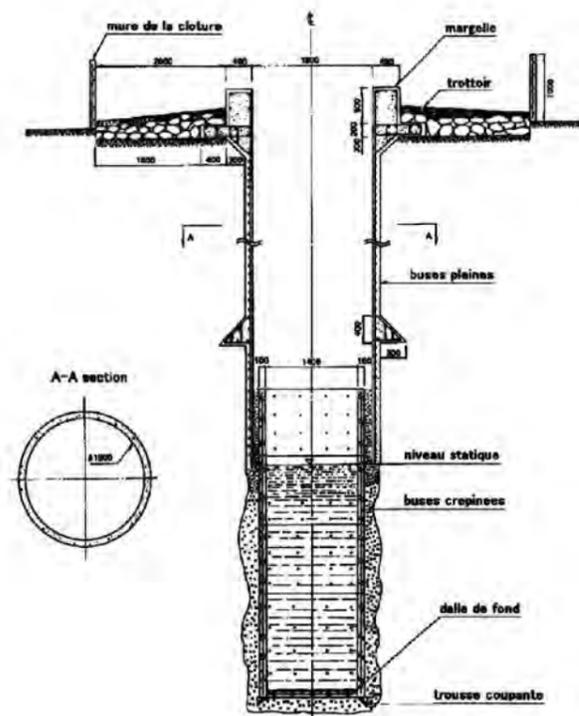
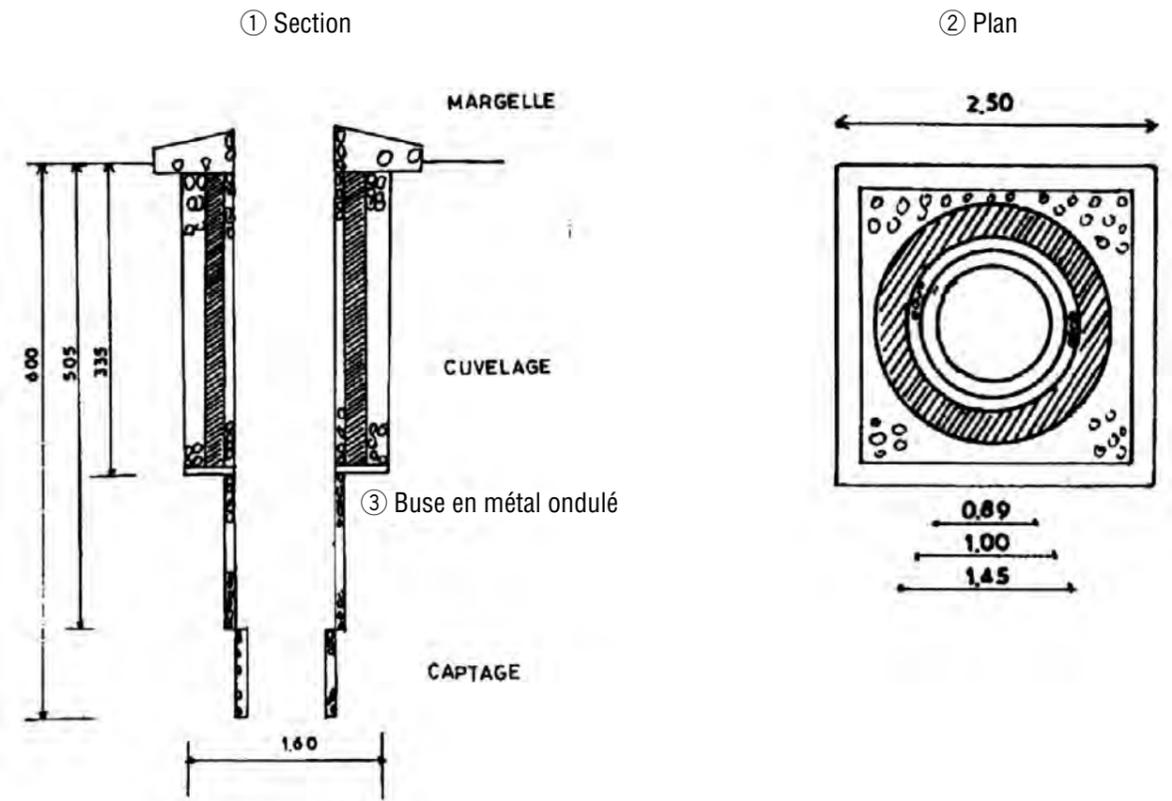


Tableau 4.4.1 Aperçu de la structure des puits

Type de puits	Caractéristiques du puits	Particularités	Application	
Puits moderne	Puits moderne à trou de grand diamètre	Dia. 1,2 - 1,8 m env. Profondeur - 50 m Tubage en béton armé Pompage manuel ou par pompe	Coût d'installation élevé (250.000 à 400.000 F CFA/m) Creusement manuel ou par équipement à grappin Plusieurs poulies sont placées dans la partie supérieure pour permettre le pompage simultané par plusieurs personnes	Couche aquifère peu profonde à moyennement profonde Exploitation de la couche aquifère (puits à eau potable, puits pour l'irrigation dans la pénéplaine etc.)
	Forage	Dia. de 0,1 à 0,3 m environ Grande profondeur possible Tubage en acier, revêtement en PVC Puisage par pompe	Installation relativement bon marché (80.000 - 130.000 FCFA/m) Sondeuse spécifique requise pour le creusement Pompage par pompe manuelle aussi possible	Exploitation de couche aquifère relativement profonde (puits à eau potable etc.)
Puits semi-traditionnel	Dia. env. 1,0 m Profondeur - 10 m Tubage en tube ondulé Pompage manuel ou par pompe	Installation relativement bon marché (60.000 - 80.000 F CFA/m) Pompage manuel possible Recyclage de buses en métal ondulé possible	Exploitation de couche aquifère peu profonde (puits d'irrigation dans la plaine d'inondation d'un oued etc.)	

* Le coût d'installation des puits est celui des études JGRC.

2) Profondeur des puits

L'épaisseur de la couche aquifère (= profondeur du socle) et des données concernant les variations saisonnières du niveau des eaux souterraines sont nécessaires pour la définition de la profondeur d'un puits, et ces informations sont collectées au stade de l'étude de la situation actuelle. La profondeur la plus efficace est fixée sur cette base en tenant compte de conditions générales telles que les techniques de creusement applicables sur place, les méthodes de pompage et le budget disponible.

Si la profondeur du puits est trop faible par rapport au niveau des eaux souterraines, il risque de se tarir à la baisse du niveau d'eau pendant la saison sèche. Compte tenu de la période d'utilisation du puits et du volume de pompage requis, une profondeur assurant une marge suffisante est requise.

Dans le cas d'un puits moderne à grand diamètre, il est souhaitable de placer le fond du puits 5 m au-dessous de la surface des eaux souterraines au moment du forage.

Un puits peu profond est possible si l'objectif d'utilisation est l'irrigation ou l'alimentation du bétail, mais pour l'alimentation en eau potable des habitants, un puits profond de plus de 30 m au moins est souhaitable pour éviter la pollution due aux bactéries, etc..

3) Tubage

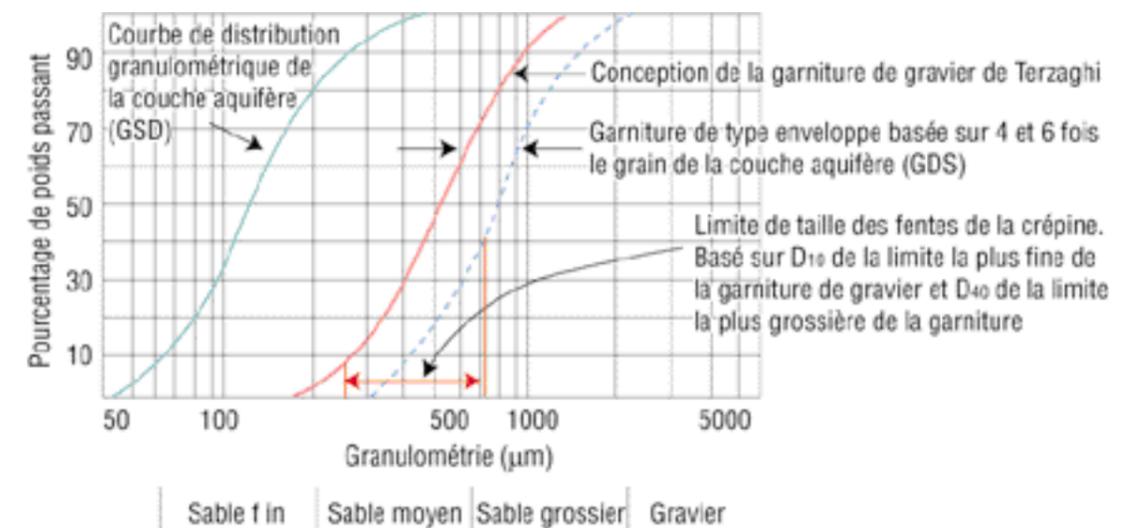
Après le creusement, un tubage est inséré dans le trou pour protéger ses parois. Un tube en béton, tube en fer, tube ondulé, tube en plastique, tube en PVC etc. est généralement utilisé, mais au Sahel on utilise aussi des parpaings et des blocs de briques. Cependant, si la couche aquifère est consolidée et que les risques de destruction sont faibles, la finition telle quelle sans tubage est possible. Une crépine est installée sur le tronçon de la couche aquifère. La crépine peut être un tubage avec cannelures et petits trous, ou bien une crépine spéciale. La première est bon marché, mais le taux d'ouverture faible, de 2 à 3%. La seconde est chère mais le taux d'ouverture élevé atteint jusqu'à 20%. Il ne sert à rien que le taux d'ouverture soit supérieur au taux d'espaces dans la couche aquifère, mais plus de 10% au moins est nécessaire. Néanmoins si le volume de pompage est très faible, et le pompage fait par seau de puits, le taux d'ouverture peut être plus petit.

4) Filtre

L'espace entre le tubage et la paroi du trou est garni d'un matériau de filtrage, par exemple du gravier. L'objectif de ce filtre est d'empêcher la pénétration dans le puits des grains de sable fin composant la couche aquifère. Il est donc inutile dans le cas d'une couche consolidée. En particulier, les puits installés à des emplacements inondés pendant la saison de pluie dans la plaine d'inondation etc. composée d'une couche aquifère en sable délié, au moment de l'inondation, il arrive que le sable entourant la crépine s'écoule dans le puits par les trous de la crépine et l'obstrue, et que les environs du puits s'affaissent. Une mesure adaptée, comme l'installation d'un filtre à grains de grosseur convenable sur le pourtour de la crépine, est requise.

Il est souhaitable que les grains du filtre, à distribution similaire à la distribution granulométrique de la couche aquifère, soit de 4 à 6 fois plus gros. (Fig. 4.4.6). Une épaisseur de 75 - 150 mm est adaptée.

Fig. 4.4.6 Conditions granulométriques du filtre (Clark, 1988)



5) Superstructure et aménagement du pourtour du puits

Pour éviter la pollution par pénétration d'eau de surface, le tubage sera surélevé par rapport au sol, et un coulis de scellement sera exécuté entre le tubage et la paroi du trou, ou bien un tablier en béton sera installé. La

clôture autour du puits permettra de protéger la qualité de l'eau en maintenant le bétail à distance.

Sur les puits à trou de grand diamètre, il est souhaitable d'installer des poulies sur la partie supérieure du puits pour faciliter le pompage en utilisant un seau de collecte. L'installation de plusieurs poulies permettra à plusieurs personnes de puiser en même temps. Les Figures 4.4.7 et 8 donnent un exemple d'ouvrage de la partie supérieure d'un puits moderne à trou de grand diamètre.

Fig. 4.4.7 Exemple de superstructure d'un puits moderne à trou de grand diamètre (1)

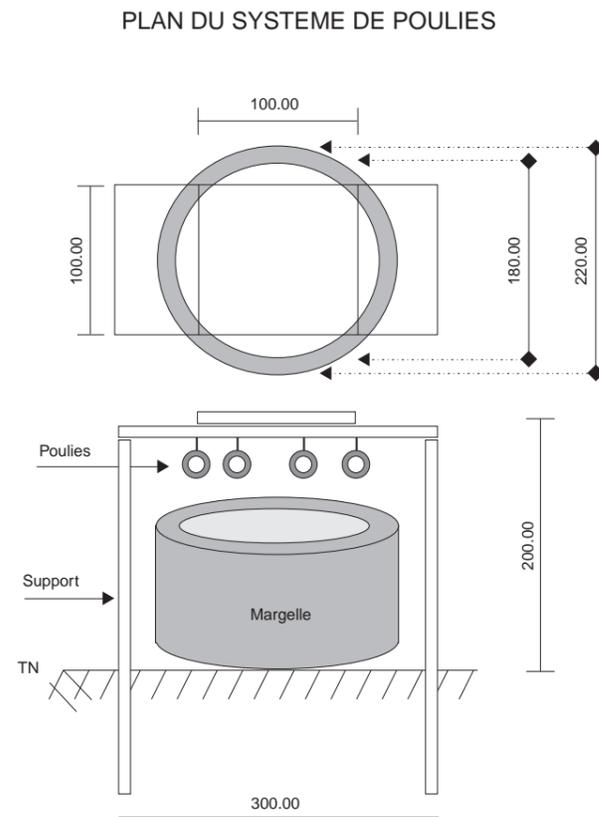
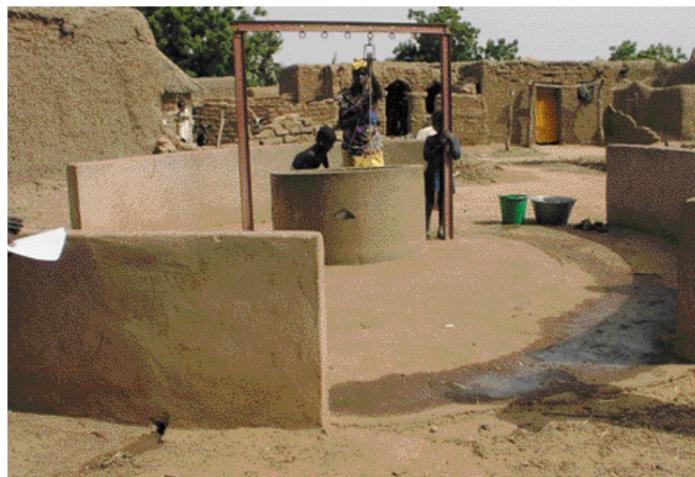


Fig. 4.4.8 Exemple de superstructure d'un puits moderne à trou de grand diamètre (2)



4.4.3 Exécution d'un puits

Un puits peut être creusé manuellement ou mécaniquement, et le creusement mécanique se subdivise encore en type rotatif, à percussion et avec grappin.

Le creusement manuel est largement applicable parce qu'il n'exige pas d'équipements spéciaux ni de techniques avancées, mais le creusement en grande profondeur est impossible, et creuser au-dessous du niveau de la surface des eaux souterraines n'est pas facile. Le creusement à la pelle est possible si la couche est meuble. Un marteau piqueur avec compresseur ou de la dynamite sont utilisés en cas de couche dure.

Lors du creusement manuel, il est nécessaire d'étayer le trou, et d'assurer la sécurité en prévoyant une échelle de secours ou une pompe d'évacuation d'eau complémentaire etc. en cas de creusement au-dessous de la surface des eaux souterraines.

Il est aussi souhaitable d'effectuer les travaux pendant la saison sèche et de les terminer avant le début de la saison de la pluie. Pour le creusement manuel, il sera facile de creuser plus profondément parce que le niveau des eaux souterraines est bas pendant la saison sèche. En cas d'installation d'un puits dans la plaine d'inondation d'un oued, le creusement est non seulement impossible pendant la saison de pluie à cause de l'inondation, mais il est aussi possible qu'un puits en cours d'exécution soit détruit et comblé par écoulement d'eau. De plus, la saison sèche étant la saison de repos pour les travaux agricoles, ce qui permet d'obtenir facilement la coopération des habitants par l'offre de main-d'oeuvre pour l'aménagement de puits.

4.4.4 Réhabilitation de puits

Les puits traditionnels sont souvent utilisés pour l'eau potable et l'alimentation du bétail. Mais certains d'entre eux, pas assez profonds, ne permettent pas d'obtenir suffisamment d'eau. De plus, sur beaucoup de puits, le tubage du trou étant insuffisant, l'eau à l'intérieur est polluée, des colibacilles ont été détectés, etc. ce qui rend l'eau inadaptée pour la boisson.

La réhabilitation d'un puits traditionnel est réalisée dans le but d'assurer la quantité d'eau nécessaire, mais aussi de préserver la qualité de l'eau du puits. La réhabilitation consiste à lui donner une structure similaire à celle d'un puits moderne à trou de grand diamètre.

Les Tableaux 4.4.2 et 3 présentent des exemples de puits réhabilités par la JGRC au Mali.

Tableau 4.4.2 Teneur et effets de la réhabilitation de puits

Teneur de la réhabilitation	Effets de la réhabilitation
Surcreusement du puits	Evite le tarissement du puits par baisse du niveau d'eau
Tubage en béton armé	Augmentation de la résistance du puits Evite la turbidité de l'eau du puits par affaissement de la paroi intérieure
Diamètre de puits de 1,2 à 1,8 m	Permet le pompage par plusieurs personnes en même temps
Installation d'un support permettant la mise en place de 4 poulies	
1 m de relevage par rapport à la surface du sol	Empêche la pénétration de matières étrangères dans le puits
Couverture des environs du puits de dalles en béton	Evite la pénétration dans le sol d'eau polluée de la surface
Construction d'un mur de protection autour du puits	Eloigne le bétail du puits, et évite la pollution de l'eau par les excréments

Tableau 4.4.3 Frais de réhabilitation par puits

Rubrique	Norme et quantité	Montant (FCFA)	
1. Frais de transport et d'installation des équipements			250.000
2. Frais de fabrication du tubage en béton armé (ø 1,0 - 1,2 m, 45 unités)			1.692.000
Armatures	ø 8mm, 135barre	182.300	
Ciment	135 sacs	742.500	
Fils de fer	5 kg	2.300	
Sable et gravier		201.000	
Frais de main d'oeuvre	50% du total des frais de matériaux	564.000	
3. Frais de forage et frais d'installation du tubage (profondeur 32 m)			2.239.000
Frais de forage	Terrain 10 m	390.000	
Frais de forage	Roche dure 22 m (utilisation d'un compresseur)	1.731.000	
Frais de main-d'oeuvre		45.000	
Frais de personnel	Creuseurs de puits	29.100	
Frais de personnel	Assistant	33.800	
Allocation de risque		10.200	
4. Frais de la mise en place de la superstructure			542.000
Armatures		26.300	
Ciment	15 sacs	82.500	
Planches	12 m	42.000	
Sable, gravier, pierres		140.500	
Support, poulies		63.000	
Soudure		7.000	
Frais de personnel	50% du total des frais de matériaux	180.600	
5. Frais de l'étude de reconnaissance sur place			95.000
6. Frais complémentaires			20.000
Total			4.838.000

* La part de travail fournie par les habitants pour l'installation du puits a été déduite du coût.

4.4.5 Gestion et entretien d'un puits

1) Entretien de fonction d'un puits

Les fonctions du puits baissent avec le temps. Les principales causes en sont l'obstruction du puits par l'écoulement de terre de la couche aquifère et de la surface, et le colmatage de la crépine par le dépôt calcaire (carbonate de calcium, quartzite, matières déposées telles que fer). Un dragage périodique permettra d'éviter l'obstruction. Contre le colmatage, on lavera la crépine et éliminera le dépôt avec du vinaigre. S'il s'agit d'un puits à grand diamètre, on pourra relativement facilement entrer à l'intérieur pour faire les travaux, mais pour un forage la maintenance n'est pas facile, il faut utiliser des équipements spéciaux pour le pompage et le transfert.

De plus, dans les zones où le niveau des eaux baisse au fil du temps, le surcreusement des puits devient nécessaire.

2) Conservation de la qualité de l'eau

La construction ou la réhabilitation de puits avec la structure pour la conservation de la qualité de l'eau précitée sont efficaces pour obtenir une eau de bonne qualité dans les puits à eau potable. L'amélioration de la méthode habituelle d'utilisation du puits et une maintenance et gestion efficaces du puits sont aussi essentielles.

Le Tableau 4.4.4 indique la méthode de maintenance et gestion pour entretenir ses fonctions au puits et assurer la conservation de la qualité de l'eau.

Tableau 4.4.4 Méthode de maintenance et gestion de puits

Rubrique	Méthode de maintenance et gestion
Conservation de la qualité de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> Le puits à eau potable est utilisé uniquement pour l'eau potable, et non pour le bétail. Si le puits sert pour l'eau potable et l'alimentation du bétail, l'abreuvoir pour le bétail doit être éloigné du puits. Les instruments de puisage (gants en caoutchouc, cordon) ne doivent pas être posés directement sur le sol. L'évacuation des eaux usées doit être bonne aux environs du puits, pour éviter la pénétration d'eau polluée dans le sol aux environs du puits. Les environs du puits doivent être nettoyés périodiquement. Un couvercle doit être placé sur un puits de grand diamètre.
Gestion du puits de grand diamètre	<ul style="list-style-type: none"> Le sable accumulé dans le fond du puits doit être périodiquement éliminé. Le puits doit être surcreusé si nécessaire. La superstructure du puits doit être réhabilitée
Gestion des forages	<ul style="list-style-type: none"> La maintenance de la pompe doit être effectuée périodiquement. La pompe doit être réparée. Le nettoyage par serge ou torchon doit être périodiquement effectué.

3) Système de maintenance et gestion

Une maintenance et gestion adaptée est requise pour l'exploitation durable du puits.

La maintenance et gestion est en principe réalisée par les habitants (bénéficiaires). Pour cela, il est souhaitable que les habitants créent eux-mêmes un comité de gestion du puits pour assurer la maintenance et gestion. Un système de perception des frais de prise en charge (frais d'utilisation) auprès des utilisateurs du puits doit être mis en place pour assurer les frais de maintenance et gestion.

La sensibilisation et l'éducation des habitants à la nécessité et aux méthodes de maintenance et gestion de l'installation sont aussi essentielles.

Documents de référence

- BANNERT, et al.(1980):Etude de reconnaissance des ressources en Afrique a l'aide d'images de satellite en République de Haute-Volta : Géologie, Hydrogéologique, Pédologie et Utilisation du sol. Bundesanstalt fur Geowissenschaften und Rohstoffe,Hannover.
- BRASSINGTON,R.(1988):Field Hydrogeology,Geological Society of London Professional Handbook Series,John Wiley,175pp.
- BRGM(1960):Afrique Occidentale-Carte Géologique. 1:2000000
- Brutsaert, w. and Stricker, H. (1979):An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration:Waster Resour. Res. 15 (2), 443-450pp.
- CASTANY,G.(1982):Principes et méthodes de l'hydrogéologie, BORDAS,Paris, 236pp.
- CLARK,L..(1988):The Field Guide to Water Wells and Boreholes. Geological Society of London Professional Handbook Series,John Wiley,155pp.
- COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDE HYDRAULIQUES (1982) : Essais de Débit Simplifiés sur Puits
- COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDE HYDRAULIQUES (1988) : Essais de Débit Simplifiés sur Forages D'hydraulique villageoise
- Glenn., et al.(1993):Soil and Water Conservation Engineering, John Wiley & Sons.
- U.S.DEPARTMENT OF AGRICULTURE(USDA)(1954):Handbook No.60.
Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils.GPO,Washington,DC.
- MEYER DE STADELHOFEN, C. (1991) Applications de la géophysique aux recherches d'eau, Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 183 pp
- Peuch,C. et Chabi-Gonni, D. (1983): Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale: CIEH, Ouagadougou
- J Rodier and C.Auvry (1965): Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 Km² en Afrique Occidentale: CIEH, Orstom, Paris
- WRIGHT,E.P.,et al..(1987):Collector wells in crystalline basement aquifers:a review of results of recent research.
In:Proceedings of the XXI Congress of the International Association of Hydrogeologists,Rome,Italy,12-17 April 1987.
- Comité d'édition du guide des eaux souterraines révisé (1998): Guide des eaux souterraines révisé, 308pp: Etude d'industrie de la construction

JGRC

La Société Japonaise des Ressources Vertes (JGRC) est une personnalité juridique sous tutelle du Ministère de l'Agriculture, des Forêts et de la Pêche.

Au Japon, elle s'occupe entre autres de l'aménagement général des terres agricoles, du boisement et de la construction de routes forestières.

Ses activités de coopération au développement des communautés agricoles dans des zones de pays en développement ont commencé en 1982. Depuis quelques années, elle s'occupe surtout activement d'études visant l'élaboration de mesures de lutte contre la désertification et de lutte contre l'érosion des sols pour faire face aux problèmes environnementaux d'envergure mondiale.

JGRC

Adresse: Shuwa Shiba Park Bldg., 2-4-1 Shibakoen, Minato-ku,
Tokyo 105-0011 Japon

Tél: 0081-3-3433-4240 (Département des activités outre-mer)

Fax: 0081-3-3436-1827

E-mail: overseas-activities@green.go.jp

ABN

L'Autorité du Bassin du Niger (ABN) est une Organisation Intergouvernementale créée en 1964 qui comprend neuf (9) pays riverains du Fleuve Niger : Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Guinée, Mali, Niger, Nigeria et Tchad.

Les objectifs de l'ABN sont :

- harmoniser et coordonner les politiques nationales de mise en valeur des ressources du bassin du Niger
- planifier le développement du bassin en élaborant et en exécutant un "Plan de Développement Intégré du Bassin"
- concevoir, réaliser, exploiter et entretenir des ouvrages et des projets communs.

ABN

Adresse: BP 729, Niamey, Niger

Tél: 00227-723102

Fax: 00227-724208

E-mail: abnsec@intnet.ne

Web: <http://www.abn-nba.org>