

Projet Experimental de Lutte Contre la Desertification

**Technologie du barrage souterrain de Naré
(Province du Namentenga)**

BURKINA FASO

Mars, 2004

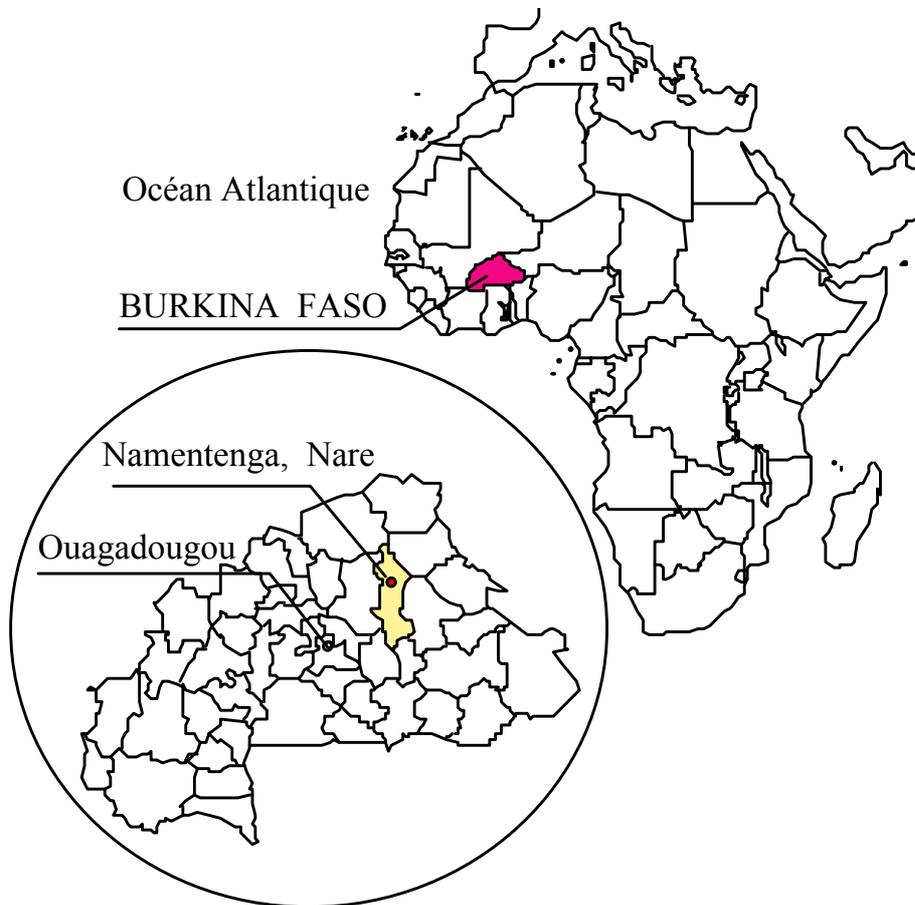
**Ministère de l'Environnement du Japon
Centre de Coopération Outre-mer pour l'Environnement**



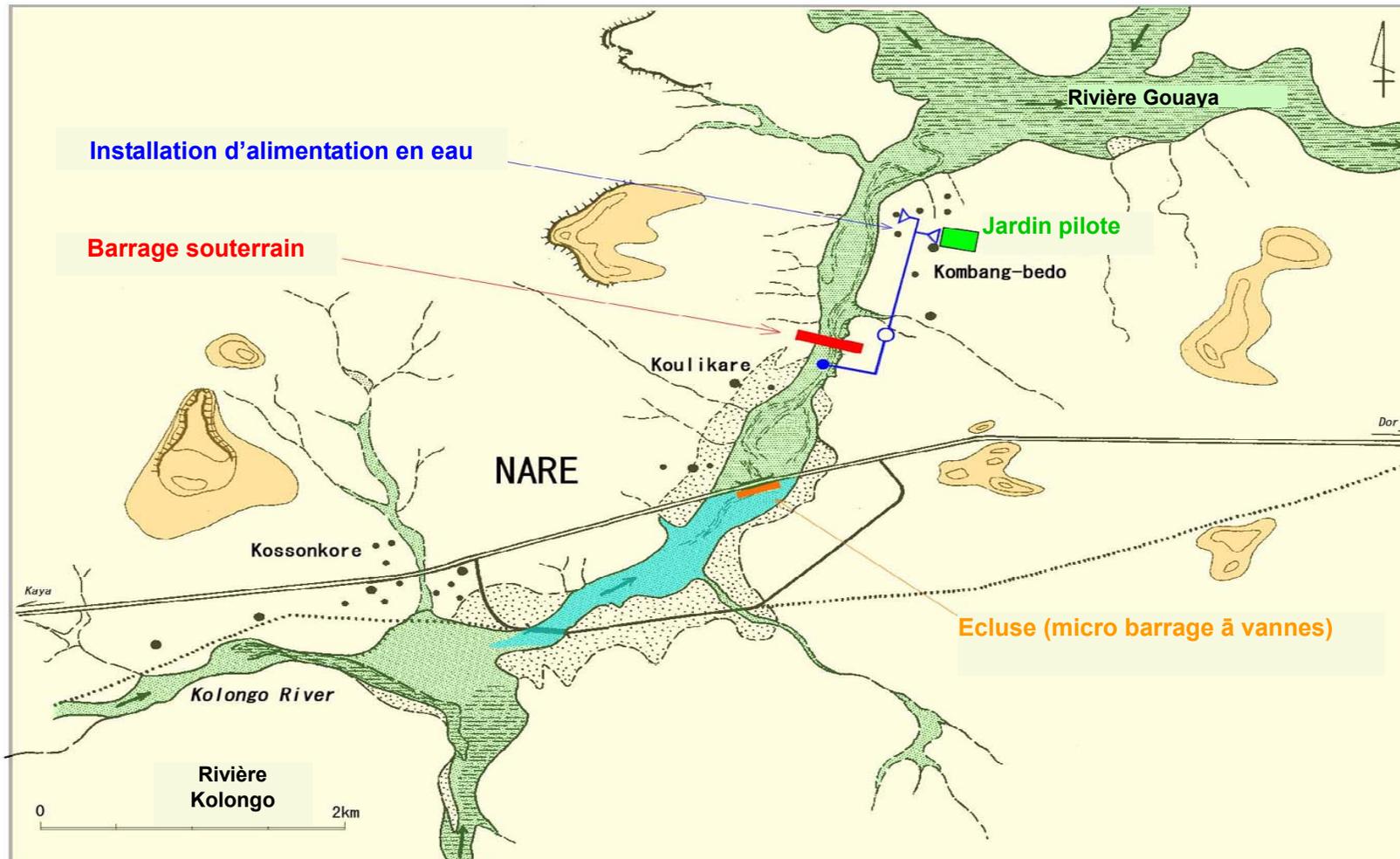
Photo: Situation du projet de construction du barrage souterrain

-Situation du projet de construction du barrage souterrain-

Le barrage souterrain a été construit par une méthode de construction creusant l'étendue d'écoulement d'eau souterraine jusqu'à la roche en place et construisant le corps du barrage au point d'excavation. La partie roulée est le corps du barrage. Le point d'excavation d'alentour sont remblayé en même temps que la construction du corps du barrage, et finalement, celui-ci est complètement enterré.



Plan de situation pour le projet



Croquis de situation de l'ouvrage expérimental dans le village de Nare

Introduction

La désertification, un des importants problèmes d'environnement qui se posent à l'échelle du globe, affecte 25% des terres émergées et un sixième de la population mondiale. Elle porte atteinte particulièrement à des pays en voie de développement, notamment de l'Afrique, où sa progression menace la survie des populations.

Afin d'y remédier en coopération internationale, un traité de lutte contre la désertification a été adopté en 1994 à l'Assemblée Générale de l'ONU et entré en vigueur en 1996. Le Japon l'a ratifié en 1998. Le traité précise que les pays industrialisés doivent fournir leur aide financière et technique aux pays en voie de développement affectés par la désertification. Il attache en outre de l'importance à l'emploi des moyens techniques adaptés aux conditions locales pour toute assistance technique. Notre pays est également sollicité d'apporter sa contribution avec les techniques dont il dispose. Mais, n'ayant pas sur son territoire de régions gravement affectées par la désertification, il n'a pas suffisamment d'informations et de connaissances sur la situation réelle de pareilles régions.

Le Ministère de l'Environnement du Japon s'était engagé dans la lutte contre la désertification avant même la ratification du traité. Une de ces initiatives est illustrée par le "programme portant sur le projet expérimental de lutte contre la désertification" qu'il a réalisé, sous la direction d'un comité d'étude composé d'experts japonais, de 1995 à 2002 au Burkina Faso, pays faisant partie du Sahel occidental gravement touché par la désertification. Dans ce programme, après la recherche de sites, ont été exécutés de 1997 à 1998 les travaux de construction d'un barrage souterrain dans le village de Naré, Département de Tougouri, province de Namentenga, Burkina Faso. Des études ont été menées ensuite pour déterminer en particulier l'efficacité du barrage souterrain, son utilisation rationnelle, ses incidences sur l'environnement. Le programme s'est ainsi terminé en mars 2003.

Le présent rapport est rédigé dans l'intention de fournir non seulement au Burkina Faso mais aussi à tous les pays souffrant de la désertification ainsi qu'à l'ensemble de la communauté internationale les informations et les connaissances acquises au cours du programme. Nous espérons vivement qu'il pourra servir à lutter contre la désertification.

Mars 2004

Service des Mesures Conservatoires de l'Environnement, Ministère de l'Environnement
Overseas Environmental Cooperation Center
(Centre de Coopération Outre-mer pour l'Environnement)

Sommaire

Introduction

1.	Description générale du projet expérimental de lutte contre la désertification et évaluation de ses resultants	5
1-1	Historique et but du projet	5
1-2	Exécution du projet	6
1-3	Organisation du projet	7
1-4	L'aménagement experimental	7
1-5	Evaluation des résultats et perspectives d'avenir	9
2.	Qu'est-ce qu'un barrage souterrain ?	11
2-1	Concept du barrage souterrain	11
2-2	Avantages du barrage souterrain	13
2-3	Inconvénients du barrage souterrain	13
2-4	Conditions requises pour l'emplacement du barrage souterrain	14
2-5	Vallée fossile, un site approprié à l'emplacement du barrage souterrain	16
3.	Recherche de sites pour la construction du barrage souterrain	17
3-1	Description générale des méthodes de recherché	17
3-2	Recherche de sites pour le présent projet	17
3-3	Répartition des vallées fossiles en Afrique occidentale	20
3-4	Investigations effectuées pour le présent projet	22
3-4-1	Interpretation des images du satellite et des photographies aériennes	22
3-4-2	Etude de terrain	26
3-4-3	Prospection géophysique	28
3-5	Reconnaissance détaillée (test géophysique de forage, test de perméabilité, observation de la nappe phréatique)	32
3-6	Etude socio-écomique	35
4.	Costruction du barrage souterrain	37
4-1	Methodes de construction du barrage souterrain	37
4-2	Spécificités du barrage souterrain construit à Nare	38
4-3	Travaux de construction du barrage souterrain	40
5.	Caractéristiques de la vallée fossile à Nare	44
6.	Observations de la retenue réalisée par le barrage souterrain	47
6-1	Installations d'observation de la retenue (Installations d'observation de la nappe phréatique)	47
6-2	Résultats des observations météorologiques et du débit de la rivière	51
6-3	Variation du niveau de la nappe phréatique dans le reservoir	53
6-4	Analyse de la "variation saisonière" du niveau de la retenue	58
6-5	Evaluation de la retenue réalisée par le barrage souterrain	61

7.	Autres etudes.....	66
8.	Recommandations pour les projets futurs de barrage souterrain.....	72
8-1	Chox de l'emplacement d'un barrage souterrain.....	72
8-2	Méthodes d'investigation.....	73
8-3	Techniques de construction d'un barrage souterrain.....	74
8-4	Coûts.....	75
8-5	Système de gestion et d'entretien.....	75
	Remerciments.....	77

1. Description générale du projet expérimental de lutte contre la désertification et évaluation de ses résultats

1-1. Historique et but du projet

Le traité de lutte contre la désertification, adopté en 1994 et mis en vigueur en 1996, attache de l'importance à l'emploi des moyens techniques adaptés aux conditions locales pour la mise en oeuvre des mesures contre la désertification.

Portant un intérêt particulier au "barrage souterrain", technique en cours de mise au point dans des conditions opérationnelles au Japon, pour réaliser une exploitation et une utilisation rationnelles des eaux souterraines qui constituent une ressource en eau précieuse dans les régions affectées par la désertification, le Ministère de l'Environnement a exécuté le "programme portant sur un projet expérimental de lutte contre la désertification" visant à déterminer l'applicabilité de cette techniques dans les conditions locales tant sur le plan matériel qu'au point de vue du savoir-faire.

Dans les régions arides et semi-arides où progresse la désertification, l'exploitation des ressources ne eau était jusqu'ici centrée sur les eaux de surface et les eaux souterraines profondes. L'exploitation des eaux de surface recourt en général au "barrage en surface". Or, ce dernier implique une vaste zone submergée et soulève par conséquent des problèmes, tels que destruction de la nature, les déplacements de population. Par ailleurs, s'il est consrui dans une la pénéplaine plate, le barrage en surface forme une retenue qui, avec sa superficie très grande par rapport à sa profondeur, est largement exposée à l'évaporation dans les régions arides ou semi-arides. Il ne peut donc pas assurer la fonction de "barrage-réservoir" en saison sèche, période de l'année où on a le plus grand besoin d'eau.

D'autre part, l'exploitation des eaux souterraines profondes pose le problème de la durabilité dû à la reserve limitée de ces ressources. Elle peut également être confrontée au problème de la "salinisation", si la teneur en sels des eaux souterraines est élevée. Une telle exploitation qui est inéluctablement ponctuelle du point de vue géographique risque de provoquer une concentration de la population et des animaux d'élevage et par conséquent d'accélérer le processus de désertification.

Pour éviter ces problèmes inhérents à l'exploitaion des eaux de surface ou des eaux souterraines profondes, il faut envisager la possibilité d'exploitation des "nappes phréatiques" se trouvant à une faible profondeur et s'écoulant à une vitesse relativement grande. Comme moyen d'exploiter des nappes phréatiques, le "barrage souterrain" suscite un intérêt ces dernières années. Il s'agit d'un ouvrage ayant pour but d'endiguer des nappes souterraines et accumuler de l'eau. Au Japon, cette nouvelle technique est en cours de mise au point dans des îles isolées où les cours d'eau ne sont pas bien développés. En comparaison avec le barrage en surface, le barrage souterrain a l'avantage de ne pas impliquer la submersion de terrains et, installé dans le sol, d'être à l'abri du risque de rupture. Dans les régions arides, on peut espérer d'autres avantages tels que les faibles pertes par évaporation de la retenue, l'absence du risque de prolifération de parasites. Cependant, le barrage souterrain présente des difficultés au niveau de choix de l'emplacement qui nécessite la détermination des conditions hydrogéologiques. Il est en plus désavantagé par sa modeste efficacité pour retenir de l'eau, car l'eau est accumulée dans les interstices des sols.

Dans le présent projet, nous avons choisi le barrage souterrain destiné à retenir de l'eau phréatique comme moyen technique pour exploiter des ressources en eau dans les régions arides et semi-arides et décidé de vérifier son applicabilité dans les conditions locales de l'Afrique occidentale souffrant d'une sécheresse chronique.

1-2. Exécution du projet

Le présent projet a été exécuté de 1995 à mars 2003.

(1) Choix du pays d'accueil

Le traité de lutte contre la désertification fait la remarque que de grandes sécheresses et la désertification entraînent des conséquences désastreuses en particulier en Afrique.

Pour le présent projet, a été choisi parmi les pays sahéliens le Burkina Faso qui remplit les conditions suivantes:

- 1) pays gravement affecté par la désertification
- 2) pays disposant de nappes phréatiques d'une certaine importance dans plusieurs régions
- 3) pays stable du point de vue politique

(2) Recherche de sites, effectuée de 1995 à 1996

L'analyse des images prises par satellites et des photographies aériennes ainsi que la reconnaissance générale ont été effectuées sur 35 sites retenus dans le centre et le nord du Burkina Faso, régions affectées par la désertification, parmi lesquels ont été ensuite sélectionnés des sites intéressants. Sur la base des résultats de la prospection électrique, des sondages de reconnaissance, des observations des nappes souterraines et de l'étude socio-économique, a été choisi définitivement le village de Naré, département de Tougouri, province de Nametenga, pour réaliser le projet (site du barrage souterrain).

(3) Aménagement expérimental comprenant un barrage souterrain, réalisée de 1997 à 1998

Les travaux de construction du barrage souterrain ont été exécutés pendant la saison sèche, à savoir de novembre 1997 à juin 1998, sur la rivière Kolongo qui traverse le village de Naré.

Par la suite, pendant la saison sèche après octobre 1998, des installations de pompage et d'alimentation en eau, un écluse, des installations d'observation de la nappe phréatique, des champs d'expérience et tout autre équipement de l'aménagement expérimental ont été mis en place.

(4) Essais de démonstration, effectués de 1999 à 2000

Parallèlement à l'observation de la retenue, des observations et des études suivantes ont été menées dans le but notamment de déterminer une utilisation rationnelle de l'eau retenue et les incidences sur l'environnement (en particulier la végétation):

- Observation de la nappe phréatique
- Observation météorologique (principalement pluviométrique)
- Observation du débit de la rivière
- Essais agricoles de démonstration
- Étude de végétation

(5) Observations supplémentaires, effectuées en 2001 à mars 2003

Dans le programme original, la durée du présent projet était de 6 ans (de 1995 à 2000). Mais, le relèvement de la nappe phréatique étant plus lent que prévu, il a fallu poursuivre l'observation pour déterminer l'efficacité du barrage souterrain. Le projet a été ainsi prolongé de 2 ans pour continuer l'observation de la nappe phréatique et des précipitations.

(6) L'accomplissement du projet

Le présent projet s'étant terminé en mars 2003 avec des résultats positifs, concernant le barrage souterrain et les autres installations, le Secrétariat Permanent du Conseil National pour l'Environnement et le Développement soutenable (S.P.CONED) nous a demandé de les laisser en place, compte tenu de l'amélioration des conditions de vie des habitants. Nous avons donc accepté cette demande en espérant à contribuer à la lutte contre la désertification et au développement soutenable du village de Naré et de l'ensemble du Burkina Faso.

1-3. Organisation du projet

Le présent programme portant sur un projet expérimental de lutte contre la désertification a été menée par l'organisation indiquée sur la fig. 1.1.

1-4. L'aménagement expérimental

Dans le présent projet, a été réalisé l'aménagement expérimental consisté par les installations suivantes :

(1) Barrage souterrain

Sur la rivière Kolongo traversant le quartier de Koulikare du village de Naré, a été construit un barrage souterrain ayant les caractéristiques suivantes :

- Type : barrage en terre
- Longueur en crête : 210 m environ
- Profondeur du barrage : 3,0 à 11,4 m (maximum)

(2) Autres installations d'essais de démonstration

- Installations de pompage fonctionnant à l'énergie solaire : 3 puits de pompage (d'une profondeur de 20 m environ) disposés dans le réservoir, puissance : 1,76 kw
- Installations d'alimentation en eau à buts multiples : à usage domestique, agricole et pour l'élevage
- Champs d'expérience : champs d'une superficie de 0.25 ha environ, disposés dans le village de Kombangbedo, pour une culture expérimentale de céréales et de légumes en application de diverses techniques d'irrigation, par exemple irrigation à perfusion
- Ecluse: ouvrage d'une longueur totale de 33 m et muni de 23 vannes, réalisé en mettant en oeuvre un viaduc de la route principale, situé à 1,2 km environ à l'amont du barrage souterrain, pour la réalimentation de la nappe phréatique. hauteur de la retenue : 1,2 m

(3) Installations d'observation de la nappe phréatique

- Installations d'observation de la nappe phréatique équipées d'un limnigraphe : 5 installations (les limnigraphes ont été enlevés en 2001 pour cause de vétusté)
- Puits d'observation de la nappe phréatique: 3 forages et 2 puits de grand diamètre
- Puits de pompage et d'observation: 2 forages et 4 puits de grand diamètre
- Piézomètres (puits d'observation du niveau piézométrique) : 16 forage disposés en 4 points

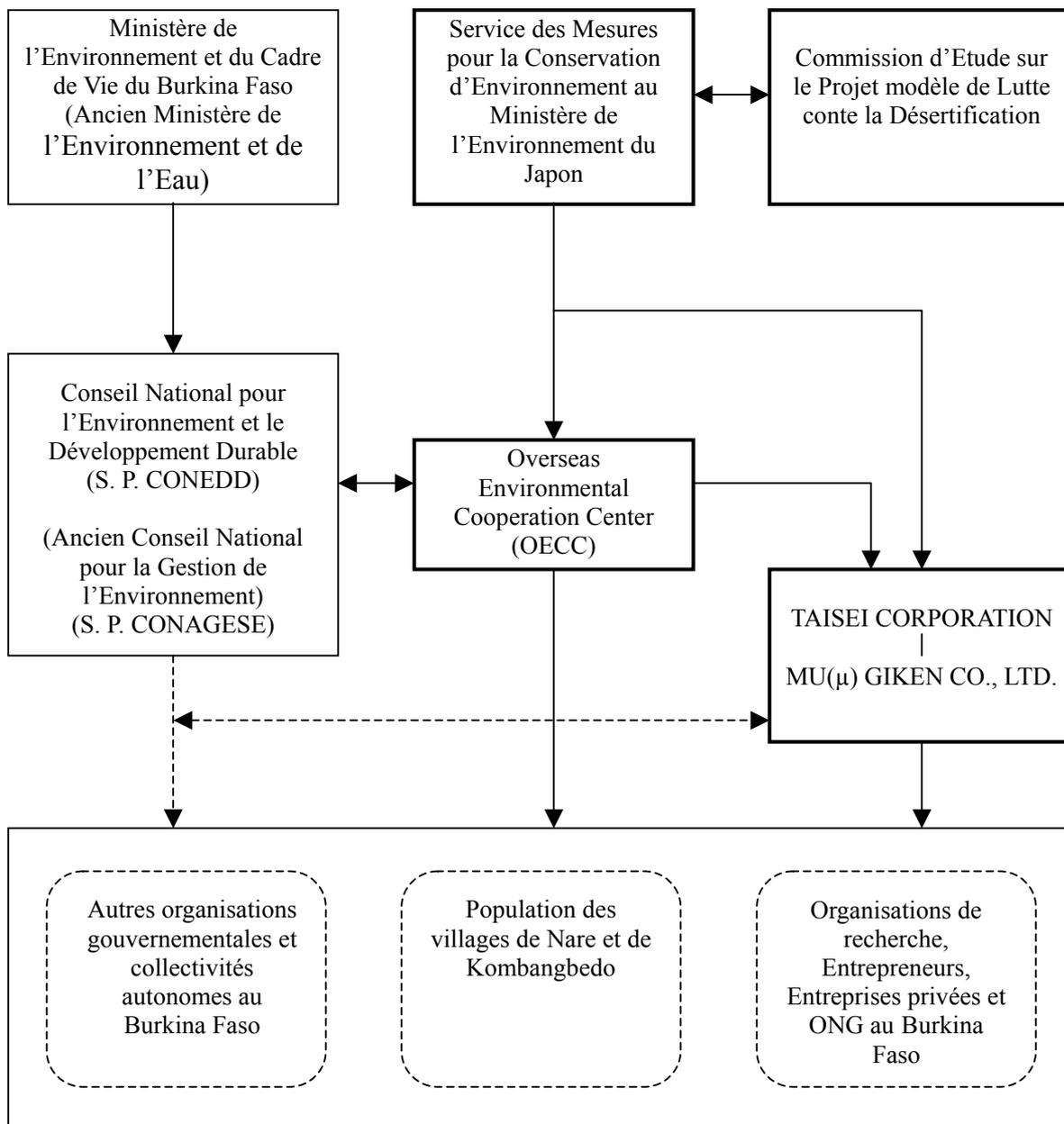


Figure 1.1: Organigramme du projet

(4) Installations d'observation météorologique (pluviométrique)

- Installation d'observation météorologique à Koulikare, village de Naré: observation des précipitations, de l'évaporation, de la température, de l'humidité, etc.
- Installations d'observation pluviométrique dans le bassin versant de Kolongo : 3 installations situées :
 - à Kossonkore, village de Naré, Province de Namentenga
 - au village d'Ouanobian, Province de Sanmatenga
 - au village de Noka, Province de Sanmatenga

1-5. Evaluation des résultats et perspectives d'avenir

(1) Retenue

Le barrage souterrain réalisé dans le présent projet retient de l'eau dans une couche-réservoir constituée de "sédiments de la vallée fossile" et de couche d'altération forte du substratum. D'après le calcul effectué au moyen d'un modèle simplifié du réservoir, l'étendue, le niveau et le volume de la retenue lorsque l'eau atteint le niveau maximal sont les suivants :

- Largeur de la retenue : 150 m environ (la plus basse estimation)
- Longueur de la retenue (distance en amont à laquelle s'étend la surface de la retenue) : 13,4 km environ
- Niveau maximal : -3,0 m
- Volume maximal : 1.800.000 m³ environ (une porosité efficace estimée de la couche-réservoir de 20 %)

Jusqu'à la fin de 2002, le niveau de la retenue (nappe phréatique) a varié de -0,7 m en saison sèche à -4,2 m en saison des pluies et n'a pas encore atteint le niveau maximal. La surface de la retenue s'étend probablement à 5 ou 6 km en amont du barrage et le volume de la retenue est donc estimé à 400.000 m³ environ à la fin de 2002.

Selon les résultats de l'analyse du bilan d'eau dans le réservoir, la réalimentation annuelle de la nappe phréatique de 1.100.000 m³ environ est assurée en saison sèche, s'il y a une précipitation comparable à celle de l'année moyenne. Compte tenu des fuites annuelles de 1.000.000 m³ environ, l'augmentation effective de la retenue est estimée à 100.000 m³ l'an.

Si la retenue augmente à ce rythme, elle atteindra la capacité de stockage de 1.800.000 m³ environ pendant la saison des pluies de 2005. L'année suivante, le volume tombera à 800.000 m³ à cause des fuites à la fin de la saison sèche. Au-delà, la retenue suivra ce cycle avec le maximum de 1.800.000 m³ en saison des pluies et le minimum de 800.000 m³ en saison sèche l'année suivante.

Les fuites ne sont pas imputables à l'étanchéité du barrage, mais à l'infiltration vers le substratum. Cela signifie que l'eau d'infiltration est retenue dans le substratum.

A noter que la retenue réalisée par le barrage souterrain fournit, par l'intermédiaire des trois installations de pompage et d'alimentation en eau fonctionnant à l'énergie solaire, aux villageois une quantité journalière de 7,4 m³ environ d'eau, soit approximativement 2.700 m³ d'eau par an.

Ainsi qu'il a été dit plus haut, l'eau s'accumule progressivement, malgré le remplissage plus

lent que prévu à cause des fuites imprévues. Il est donc clair que le barrage souterrain permet d'assurer l'alimentation en eau même en saison sèche. Pour éviter le problème des fuites (infiltration), il aurait fallu effectuer une étude hydrogéologique plus profonde lors de la recherche de sites.

(2) Coûts

Les coûts directs de la recherche de sites, de la construction du barrage souterrain et de la mise place des installations de pompage et d'alimentation en eau sont suivants (les frais de personnel pour les ingénieurs japonais sont exclus).

(En millier de yens)

Construction du barrage souterrain 108.595

Mise en place des installations de pompage et d'alimentation en eau 24.900 (dont une partie est une estimation)

Les frais de personnel pour les ingénieur japonais qui ont assuré la supervision des travaux de construction du barrage souterrain ne sont pas inclus dans les coûts indiqués ci-dessus.

(3) Structure de gestion et d'entretien

La gestion et l'entretien des ressources en eau nécessite une autogestion par les habitants et les autorités locales. Une certaine structure est déjà mise en place sur le site pour assurer des réparations sommaires des installations avec l'argent perçu à titre de taxes d'eau. Mais pour permettre une mise en oeuvre continuelle des installations, il faudrait établir une structure de gestion et d'entretien à plus longue terme.

(4) Incidences sur l'environnement

Aucune incidence sensible sur l'environnement, notamment sur la végétation, n'a été constatée jusqu'à la fin de 2002, c'est-à-dire pendant 5 années qui ont suivi la construction du barrage souterrain, grâce entre autres à l'emplacement du barrage situé à proximité du point où la rivière Kolongo conflue avec un cours d'eau plus grand.

(5) Applicabilité dans d'autres régions

Le présent projet expérimental est probablement un des rares exemples d'étude de démonstration portant sur l'exploitation des ressources en eau au moyen d'un barrage souterrain dans les zones arides ou semi-arides. Dans des régions où se trouvent des vallées fossiles, le barrage souterrain mérite d'être envisagé comme moyen d'exploiter des nappes phréatiques pour lutter contre la désertification. Les informations et les connaissances apportées par le présent projet serviront de base à de telles entreprises futures.

2. Qu'est-ce qu'un barrage souterrain

2-1. Concept du barrage souterrain

Le barrage souterrain est un système consistant à retenir des eaux souterraines par un parafouille (corps du barrage) mis en place en travers des chenaux des eaux souterrains.

Dans sa fonction de retenir de l'eau par un endiguement (barrage), il est assimilable au "barrage en surface", mais se distingue de celui-ci par ce qui suit :

(1) Il retient des eaux souterraines

A la différence du barrage en surface ayant pour but de retenir des eaux de surface (eau de rivière), le barrage souterrain est destiné à retenir des eaux souterraines. Il est toutefois destiné en général à l'exploitation des eaux phréatiques, car un barrage souterrain permettant de retenir des eaux profondes demanderait une quantité énorme de travaux de construction.

(2) Il accumule de l'eau dans des formations géologiques

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

(3) Il est construit dans le sous-sol

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

(4) Il nécessite des installations de pompage

La retenue créée par un barrage construit dans le sous-sol est naturellement à un niveau inférieur à la surface du sol. Pour l'utiliser en surface, on a donc besoin des installations de pompage.

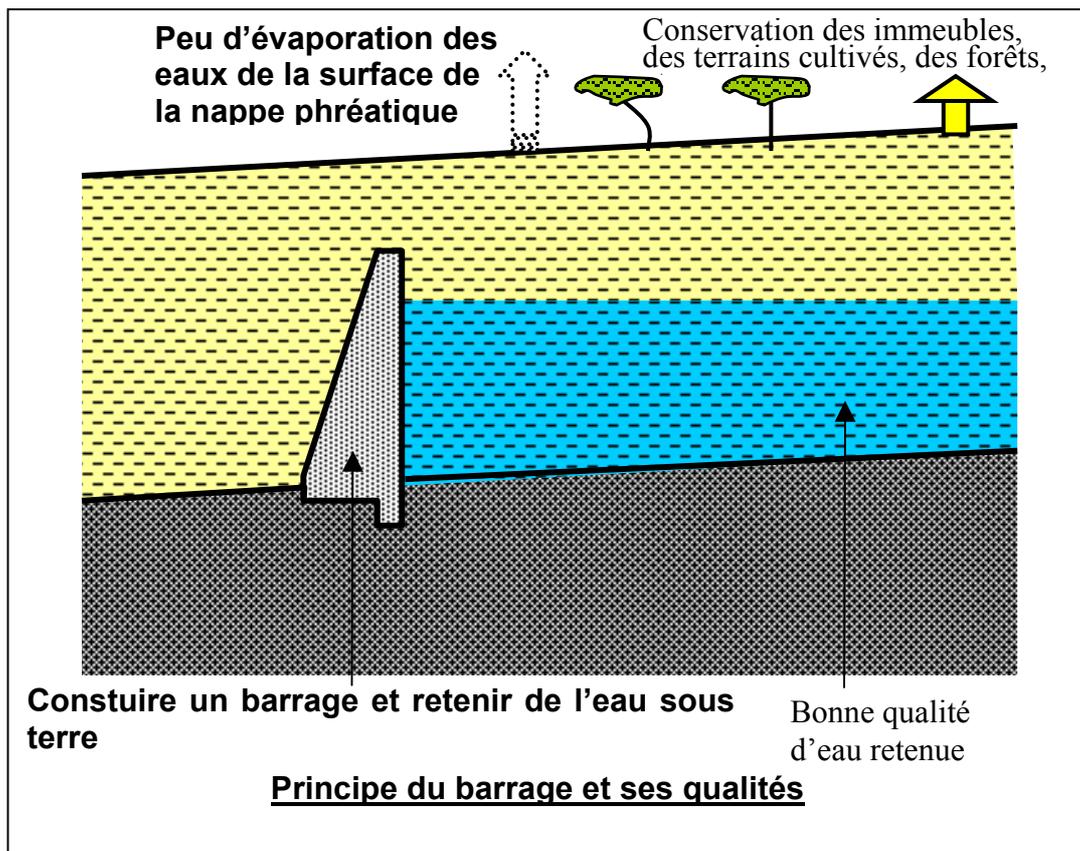
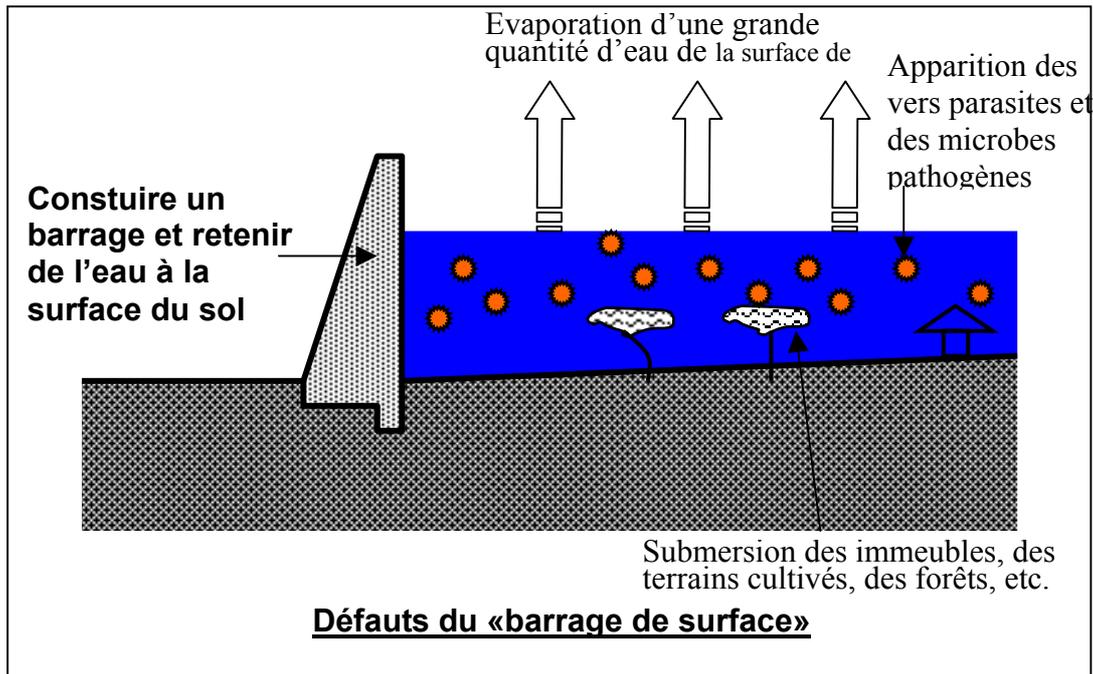


Figure 2.1: Principe du barrage souterrain

2-2. Avantages du barrage souterrain

En comparaison du barrage en surface, le barrage souterrain a les avantages suivants :

(1) Il n'implique pas de submersion de terres

A la différence du barrage en surface, le barrage souterrain, ayant pour fonction d'accumuler de l'eau dans le sous-sol, n'implique pas de submersions de terres et n'entraîne donc pas de graves destructions de la nature ni de problèmes sociaux, tels que les déplacements de population.

(2) Il peut éviter les pertes par évaporation

Dans les régions arides ou semi-arides, le barrage en surface connaît souvent d'importantes pertes par évaporation de la retenue en saison sèche. A l'opposé, la retenue créée dans le sous-sol par un barrage souterrain n'en subit qu'à un degré beaucoup plus faible. La diminution du volume utile de la retenue, due à l'évaporation, y est pratiquement nulle.

(3) Il offre de l'eau potable

Le barrage en surface risque de favoriser la prolifération de parasites d'anophèles, vecteur du paludisme, ou de germes. L'eau retenue nécessite donc un traitement, si elle est destinée à l'utilisation domestique. Quant au barrage souterrain, l'eau, étant accumulée dans le sous-sol, a une qualité largement meilleure et peut se consommer comme l'eau tirée aux puits ordinaires.

(4) Il est stable et sûr

Le barrage souterrain dont le corps est logé dans le sous-sol présente une stabilité mécanique remarquable par rapport au barrage en surface et ne nécessite donc pas d'entretien. Même si'il est endommagé, les dégâts ne s'étendent pas aux régions d'aval.

(5) Il permet d'exploiter des ressources renouvelables

Le barrage souterrain est destiné à l'exploitation des nappes phréatiques qui sont réalimentées par des chutes de pluie. Permettant ainsi d'utiliser des ressources renouvelables, il peut éviter le tarissement.

2-3. Inconvénients du barrage souterrain

Il convient toutefois de souligner que le barrage souterrain comporte les inconvénients suivants :

(1) Difficultés de choix de l'emplacement

Contrairement au barrage en surface dont les conditions de l'emplacement peuvent être vérifiées par des examens visuels, la recherche de sites et la prévision de la capacité pour un barrage souterrain doivent souvent faire appel à une estimation, par exemple, des structures géologiques.

(2) Efficacité modeste du barrage

L'eau retenue par un barrage souterrain s'accumule dans les interstices des sols qui constituent le réservoir. Le volume de la retenue est donc déterminé par le volume des vides contenus dans ces sols (porosité efficace) et n'atteint que 10 à 30 % du volume du réservoir.

(3) Interception de l'écoulement des eaux souterraines

Le barrage empêche les eaux souterraines de s'écouler en aval et peut provoquer par conséquent un tarissement dans les régions d'aval. Mais les nappes souterraines d'aval ne dépendent pas toujours uniquement des eaux souterraines se trouvant à l'emplacement du barrage. Il est par ailleurs possible de concevoir un barrage laissant passer une partie de l'eau retenue. Ce problème peut donc être résolu par un choix judicieux de l'emplacement, fait en tenant compte du mécanisme d'écoulement des eaux souterraines, ou par des modifications ingénieuses de la structure du barrage.

Dans le présent projet, la solution retenue consistait à fixer l'emplacement du barrage à proximité du confluent de la rivière Kolongo et d'un cours d'eau plus grand.

(4) Salinisation des sols du réservoir

Le barrage souterrain risque de provoquer une salinisation des sols superficiels du réservoir à la suite de la remontée à la surface et de l'évaporation subséquente de l'eau retenue. Mais ce phénomène ne peut se produire que lorsque la retenue est à un niveau proche de la surface du sol. Il est donc possible d'éviter ce problème, en fixant le niveau maximal de la retenue à une profondeur suffisante au-dessous de la surface du sol.

Dans le présent projet, le niveau maximal de la retenue (crête du barrage) a été ainsi fixé à 3 m au-dessous de la surface du sol.

2-4. Conditions requises pour l'emplacement du barrage souterrain

Les conditions physiques (conditions hydrogéologiques) requises pour l'emplacement sont les suivantes :

(1) Présence de nappes phréatiques à écoulement significatif

La présence de nappes souterraines est évidemment indispensable. Mais un barrage mise en place en travers des nappes stagnantes ne pourrait pas créer une retenue importante. Il doit donc y avoir un écoulement significatif. D'autre part, en fonction de la profondeur des aquifères, la détermination des caractéristiques hydrogéologiques du site devient plus difficile et la construction du barrage rencontre des difficultés techniques et financières d'autant plus grandes. Il en ressort que la présence de nappes phréatiques est hautement souhaitable.

(2) Présence de formations poreuses (aquifères) aptes à constituer un réservoir

L'eau retenue par un barrage souterrain s'accumule dans les formations géologiques qui constituent un réservoir. Plus le volume des vides contenus dans ces formations (porosité efficace) est élevé, plus le remplissage de la retenue est efficace. Cette condition est requise également pour faciliter l'écoulement des nappes.

(3) Présence des terrains peu perméables qui ferment le réservoir

Le réservoir doit être fermé sur le fond et latéralement par des terrains peu perméables. S'il y a des voies d'eau importantes, le barrage ne peut pas assurer un remplissage efficace de la retenue.

(4) Présence d'une partie rétrécie dans le terrain peu perméable

Par souci d'économie des travaux de construction, il est désirable de mettre en place le barrage souterrain, comme dans le cas du barrage en surface, en un endroit où le substratum peu perméable se rétrécit et en amont duquel s'étend un vaste aquifère (relief en étranglement).

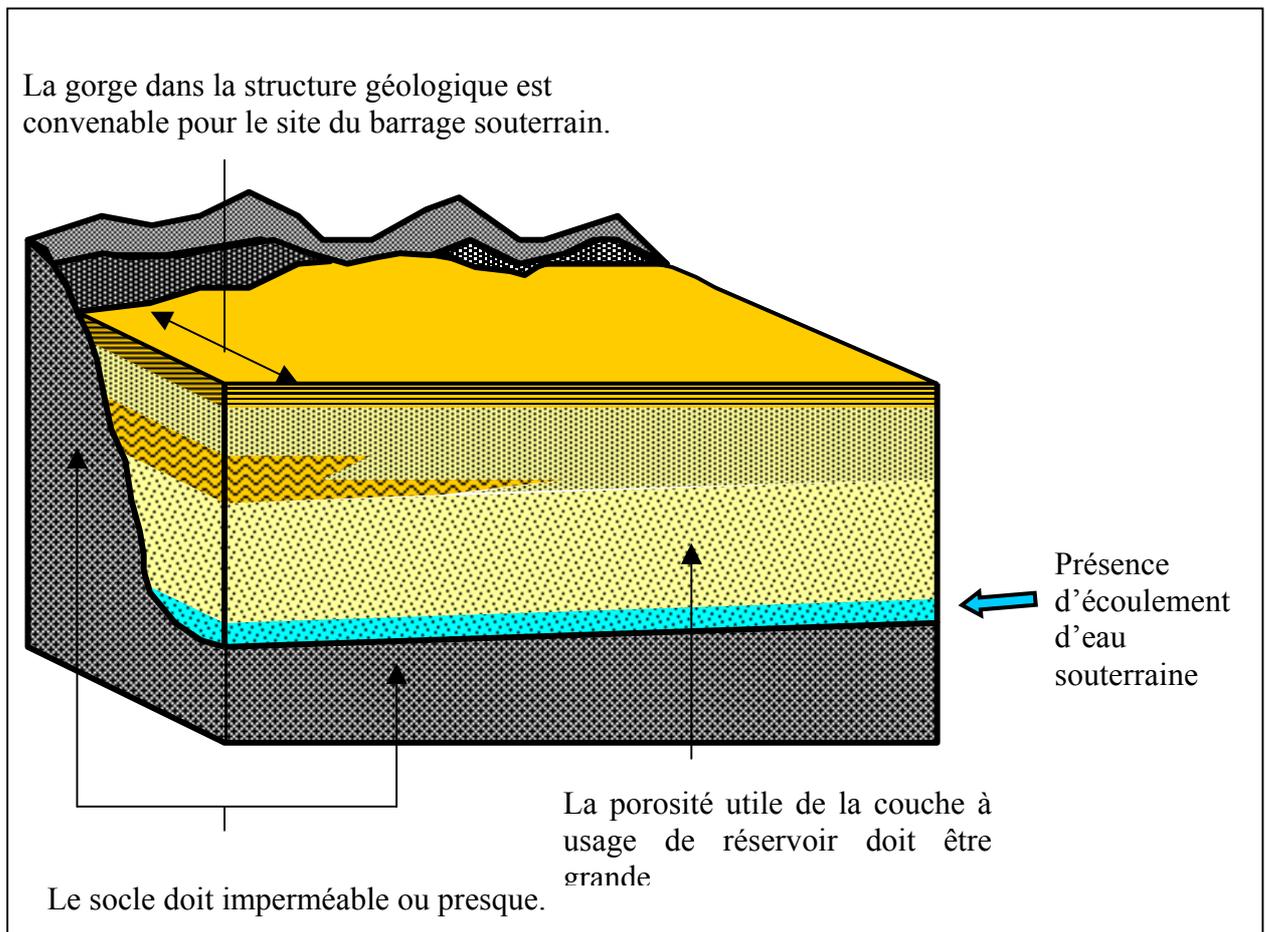


Figure 2.2: Conditions convenables pour le site de construction du barrage souterrain

2-5. "Vallée fossile", un site approprié à l'emplacement du barrage souterrain

(1) Qu'est-ce qu'une "vallée fossile"

Une des structures topographiques et géologiques pouvant remplir les conditions énumérées ci-dessus est la "vallée fossile". Il s'agit d'une vallée formée par l'action érosive de l'ancien cours d'eau et recouverte ensuite d'un nouveau dépôt d'alluvions, appelée également "vallée enfouie"

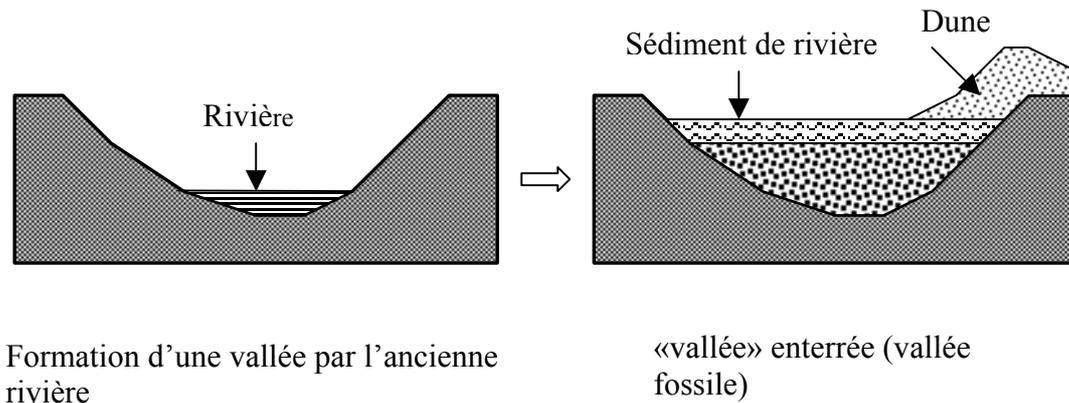


Figure 2.3: Croquis schématique de la «vallée fossile»

(2) La vallée fossile est en général considérée comme ayant les caractéristiques suivantes, qui sont aptes à l'emplacement d'un barrage souterrain.

1) La vallée fossile, formée à la suite de l'enfouissement de l'ancien cours d'eau (ancienne vallée), conserve probablement le mécanisme de drainage de l'ancien cours d'eau sous forme de celui des nappes phréatiques dans les régions stables qui n'avaient pas subi des influences des mouvements postérieurs de l'écorce. A noter également qu'elle ne comporte certainement pas de "voies d'eau" irrégulières

2) Dans le cas d'une vallée fossile formée dans le soubassement par l'érosion, ses versants et son fond constitués par le soubassement sont imperméables et peuvent donc former un réservoir ayant très peu de risque de fuites.

3) Les "sédiments de la vallée fossile" qui recouvrent la vallée fossile sont composés d'alluvions, de sables en provenance de dunes et d'autres sédiments postérieurs. Ces sédiments non consolidés et poreux sont favorables pour former un réservoir.

3. Recherche de sites pour la construction du barrage souterrain

Dans ce chapitre, nous décrivons les méthodes utilisées pour la recherche de sites et ses résultats.

3-1. Description générale des méthodes de recherche

D'une manière générale, le choix de l'emplacement d'un barrage souterrain se fait par étapes en opérant une sélection parmi les sites candidats de moins en moins nombreux selon la procédure suivante :

- 1) Analyse des images prises par satellites et des photographies aériennes
- 2) Reconnaissance du terrain par des études géologique et topographique
- 3) Estimation de la structure du terrain au moyen de la prospection géologique ou d'autres techniques possibles
- 4) Vérification de la structure du terrain au moyen du test de forage, de l'essai de perméabilité ou d'autres techniques possibles
- 5) Estimation du mécanisme d'écoulement des eaux souterraines à partir des résultats de l'observation des nappes

A cela s'ajoute au besoin, les données hydrologiques et météorologiques, telles que la pluviométrie et le débit du cours d'eau, sont également collectées pour déterminer la nécessité et la praticabilité du barrage souterrain.

D'autre part, la gestion et l'entretien du barrage souterrain nécessite une participation active de la communauté locale. Il faut donc mener une étude socio-économique afin de déterminer la possibilité de la participation des habitants. Une fois l'emplacement fixé, il est également important de promouvoir la participation de la communauté locale dès le stade de l'avant-projet.

3-2. Recherche de sites pour le présent projet

(1) Choix du pays d'accueil

Le traité de lutte contre la désertification fait la remarque, dans son préambule, que de grandes sécheresses et la désertification entraînent des conséquences désastreuses en particulier en Afrique. C'est d'ailleurs à la suite de la grande sécheresse qui a ravagé la partie sahélienne du Soudan de la fin 1960 au début 1970 que l'ONU s'est mise à affronter le problème de la désertification. Nous avons donc décidé de faire notre choix parmi les pays sahéliens pour exécuter le présent projet. Nous avons finalement retenu le Burkina Faso (notamment le centre et le nord de ce pays), pays qui remplit les conditions suivantes :

- 1) pays gravement affecté par la désertification
- 2) pays ayant des régions où se trouvent des nappes phréatiques d'une certaine importance
- 3) pays stable du point de vue politique

Le climat au nord du Burkina Faso est caractérisé par deux saisons distinctes :

- Saison sèche (8 mois d'octobre à mai)

- Saison des pluies (4 mois de juin à septembre)

En terme de température, l'année est marquée par deux saisons chaudes : l'une la plus chaude est de mars à mai avec la température maximale de l'ordre de 40 degrés et la température minimale de 25 à 28 degrés, l'autre est d'octobre à novembre avec la température maximale de 30 à 34 degrés et la température minimale de 22 à 23 degrés. Il y a aussi deux saisons moins chaudes : de décembre à janvier avec la température maximale de 30 à 34 degrés et la température minimale de 14 à 16 degrés, et de juillet à septembre avec la température maximale de 30 à 34 degrés et la température minimale de 21 à 24 degrés.

En allant vers le nord, la pluviométrie diminue, avec 474 mm à Dori, ville située dans le nord-est, alors qu'à Ouagadougou, la capitale Burkinabé située dans le centre, elle s'élève à 733 mm (moyennes annuelles pour la période 1990-1994). Elle est en grosse partie enregistrée en saisons des pluies.

Sur 80% du territoire nationale, se trouvent des terrains anciens précambriens.

La vie économique du pays repose principalement sur l'agriculture et l'élevage. Les terres cultivées occupent 11 % du territoire national, dont plus de 80 % sont consacrées à la culture de millet, de sorgho, de maïs, de riz. Ces productions ne se sont pas stables à cause de la pauvreté des sols et des conditions climatiques.

(3) Critères de sélection des sites pour le projet expérimental

L'importance est également attachée aux critères suivants, compte tenu du caractère expérimental du présent projet:

- 1) Possibilité de réaliser un barrage souterrain de dimensions appropriées au projet expérimental
- 2) A proximité d'un village relativement grand pour faciliter la participation des habitants au projet expérimental
- 3) D'accès facile à partir de la capitale, Ouagadougou
- 4) Absence d'autres projets pour une évaluation rigoureuse des résultats

(3) Procédure de recherche

Dans le présent projet, l'emplacement du barrage souterrain est choisi suivant la procédure donnée sur la fig. 3.1. Nous avons pris soin d'utiliser pour la recherche le matériel disponible au Burkina Faso en évitant dans la mesure du possible l'emploi des appareils spéciaux.

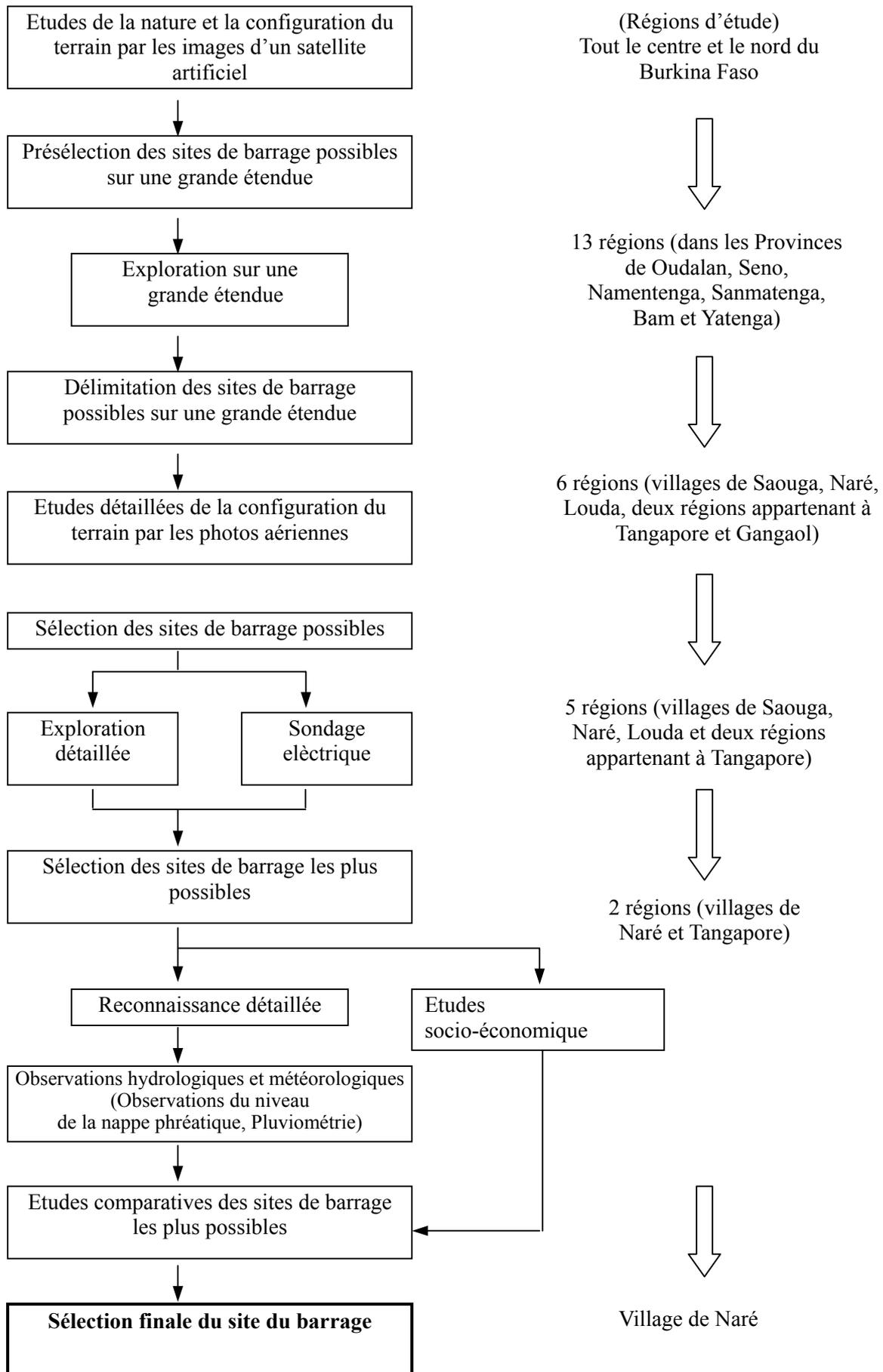


Figure 3.1: Organigramme des études de la sélection du site du barrage souterrain

3-3. Répartition des vallées fossiles en Afrique occidentale

Bien avant le lancement du présent projet, plus précisément de 1989 à 1990, une étude portant sur la praticabilité d'un barrage souterrain avait été menée au Niger et au Mali, pays faisant partie du Sahél, par une mission d'étude (Sahel Greenbelt study group) envoyée par plusieurs entreprises japonaises. Ses résultats montrent que le bassin fluvial du Niger renferme un bon nombre de vallées fossiles ayant des structures hydrogéologiques aptes à l'emplacement du barrage souterrain. La présence de vallées fossiles était constatée sur les affluents suivants: (fig. 3.2)

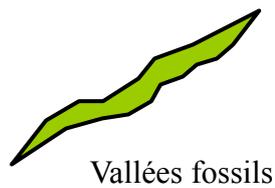
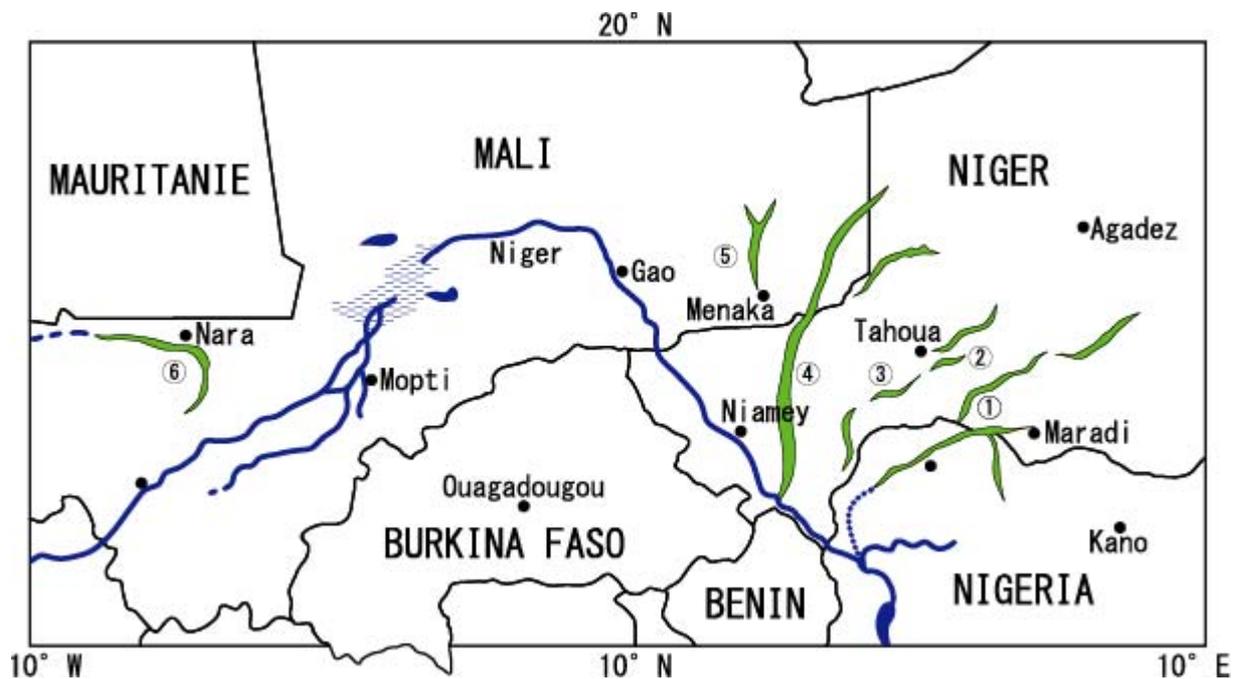
- Goulbin Kaba et la vallée de Tarka (Maradi au Niger, Sokoto au Nigéria)
- Vallée de Souma (partie sud-est de Tahoua au Niger)
- Dallol Maouri (Dan Doutchi et partie ouest de Tahoua au Niger)
- Dallol Bosso (partie est et nord-est de Niamey au Niger)
- Rivière de Ezgueret (Menaka au Mali)

La présence de vallées fossile est également constatée dans le bassin fluvial du Sénégal sur l'affluent suivant:

- Vallée de Serpent (Nara, Mali)

Sur la surface actuelle de ces vallées fossiles, s'écoulent en général des oueds (cours d'eau temporaires qui n'apparaissent qu'en saison des pluies). La largeur des vallées fossiles à la surface actuelle est considérablement importante sans proportion avec le débit des oueds et atteint plusieurs kilomètres, voire plusieurs dizaines de kilomètres dans certains cas. Dans ces grandes vallées fossiles, débouchent probablement d'autres vallées fossiles de petite à moyenne taille qui soient aptes à l'emplacement du barrage souterrain.

Ces résultats de l'étude font espérer la présence de vallées fossiles de taille appropriée, enfouies sous les cours d'eau actuels dans les régions est à nord-est du Burkina Faso, régions faisant partie du bassin fluvial du Niger, . C'est sur cette possibilité que s'appuyait la recherche de sites du présent projet, menée dans le centre et le nord du Burkina Faso .



- Goulbin Kaba - Vallée de Tarka
- Vallée de Souma
- Dallol Maouri
- Dallol Bosso
- Rivière Ezgueret
- Vallée de Serpent (affluent de la rivière Sénégal)

Figure 3.2: Distribution des vallées fossiles au Niger et au Mali

N.B.: Les «vallées fossiles» ci-dessus ont été identifiées par le Groupe d'Etude de la Zone de Verdure de Sahel du Japon en 1989 et 1990. En fait, il y aurait plus de vallées fossiles.

3-4. Investigations effectuées pour le présent projet

3-4-1. Interpretation des images du satellite et des photographies aériennes

Les images prises par satellite et les photographies aériennes sont toujours des moyens utiles pour étudier des conditions physiques (topographie, géologie, eaux de surface, végétation) d'une vaste région. Elles sont même indispensables lorsqu'on mène une telle étude dans des régions où, comme en Afrique, des terrains plats dominant et qui ne sont pas totalement couvertes par des cartes topographiques de précision.

Dans le présent projet, nous avons donc eu recours à l'analyse des images prises par satellite et des photographies aériennes pour identifier des sites possibles du barrage souterrain.

(1) Reliefs retenus comme clefs pour déceler des sites intéressants

Les reliefs suivants ont été retenus comme clefs dans la photo-interprétation :

- 1) Reliefs suggérant la présence possible de vallées fossiles : là où les champs inondables sont très étendus sans proportion avec le débit du cours d'eau (oued dans la plupart des cas) et ont une forme générale pourtant analogue à celle du cours d'eau.
- 2) Reliefs circulaires: là où la ligne de faite s'allonge de manière circulaires avec une partie dénudée. Ces reliefs sont souvent observés sur des terrains constitués de roches volcaniques. L'eau pluviale sur ce anneau peut s'accumuer dans la partie dénudée pour y former des nappes souterraines.
- 3) Reliefs en étranglement : là où la partie retrécie du substratum est recouverte de sédiments non consolidés et où de plus la présence d'un écoulement souterrain est possible.

(2) Procédure de photo-interprétation

Nous avons d'abord obtenu des images LANDSAT TM (Thematic Mapper) couvrant le centre et le nord du Burkina Faso, à partir desquelles ont été établies des photographies en fausse couleur à l'échelle de 1/500.000 et de 1/200.000. Sur la base des résultats de la photo-interprétation, ont été identifiés 13 sites pouvant avoir les reliefs et les structures géologiques appropriées à l'emplacement du barrage souterrain.

Nous avons ensuite mené une étude de terrain sur ces 13 sites, dont les résultats nous ont permis de retenir 6 sites, le reste étant éliminé en raison des difficultés suivantes identifiées:

- Structure du sous-sol difficile à déterminer ou d'une dimension trop importante pour le présent projet
- Accès difficile à partir de la capitale, Ouagadougou
- Présence d'autres projets

Sur les 6 sites ainsi retenus, des schémas d'interprétation détaillés ont été établies à partir des photographies aériennes (en noir et blanc à l'échelle de 1/20.000 à 1/50.000) pour en retenir finalement 5 sites.

Il convient de rappeler que les reliefs et les structures géologiques lus sur les images Landsat dont la résolution est faible tendent à être surestimés. L'emploi des photographies aériennes est donc recommandé pour les zones bien délimitées.

(3) Résultats de la recherche de sites

Les résultats de la recherche de sites menée à l'aide de l'analyse des images prises par satellite et des photographies aériennes ainsi que de la reconnaissance générale sont résumés sur le tableau 3-1.

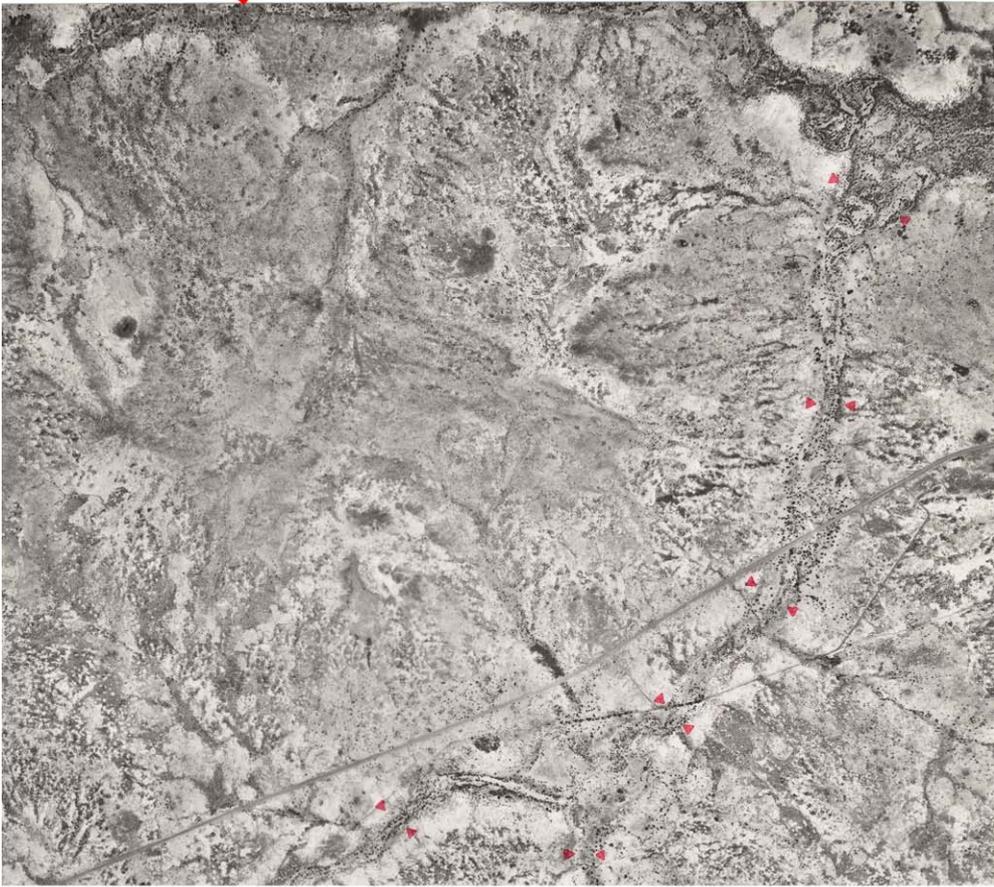
Table 3.1: Résultats de la sélection du site du barrage souterrain par les études des images du satellite et des photos aériennes, et l'exploration sur une grande étendue

Régions présélectionnées par les images de LANDSAT			Résultats de l'exploration sur une grande étendue (raison de l'abandon)	Résultats des études des photos aériennes (raison de l'abandon)
Nom du département	Nom de la région	Point visé		
Oudalan	Saouga	Vallée fossile	Possible	Possible
Seno	Nord de Dori	Vallée fossile	Impossible (La zone n'a pu être identifiée)	-
Seno	Yakouta	Vallée fossile	Impossible (L'échelle structurale est trop grande)	-
Seno	Gangaol	Vallée fossile - oued	Possible	Impossible (La surface du bassin versant est petite)
Namentenga	Naré	Vallée fossile	Possible	Possible
Sanmatenga	Koulouga	Goulet d' étranglement	Impossible (La couche des sédiments non consolidés pourraient être mince)	-
Sanmatenga	Louda	Relief circulaire	Possible	Possible
Sanmatenga	Bassneile	Relief circulaire	Possible	Possible
Sanmatenga	Tangapore	Goulet d' étranglement	Possible	Possible
Samatenga	Balou	Goulet d' étranglement	Impossible (mauvais accès)	-
Samatenga	Santabe	Goulet d' étranglement	Impossible (mauvais accès)	-
Bam	Autour de Loga	Relief circulaire	Impossible (Il y a déjà de nombreux projets)	-
Yatenga	Nord de Gongoure	Goulet d' étranglement	Impossible (mauvais accès)	-
Yatenga	Nord de Ban	Raison spéciale*	Impossible (mauvais accès)	-

Note: La construction du barrage souterrain dans cette région où la forêt est menacée d'extinction a été demandée au S. P. CONAGESE.



Image du satellite aux environs de Naré



Photographie aérienne aux environs de Naré

 Vallée fossile

Figure 3.3: Exemple d'image du satellite et photo aérienne de la «vallée fossile»

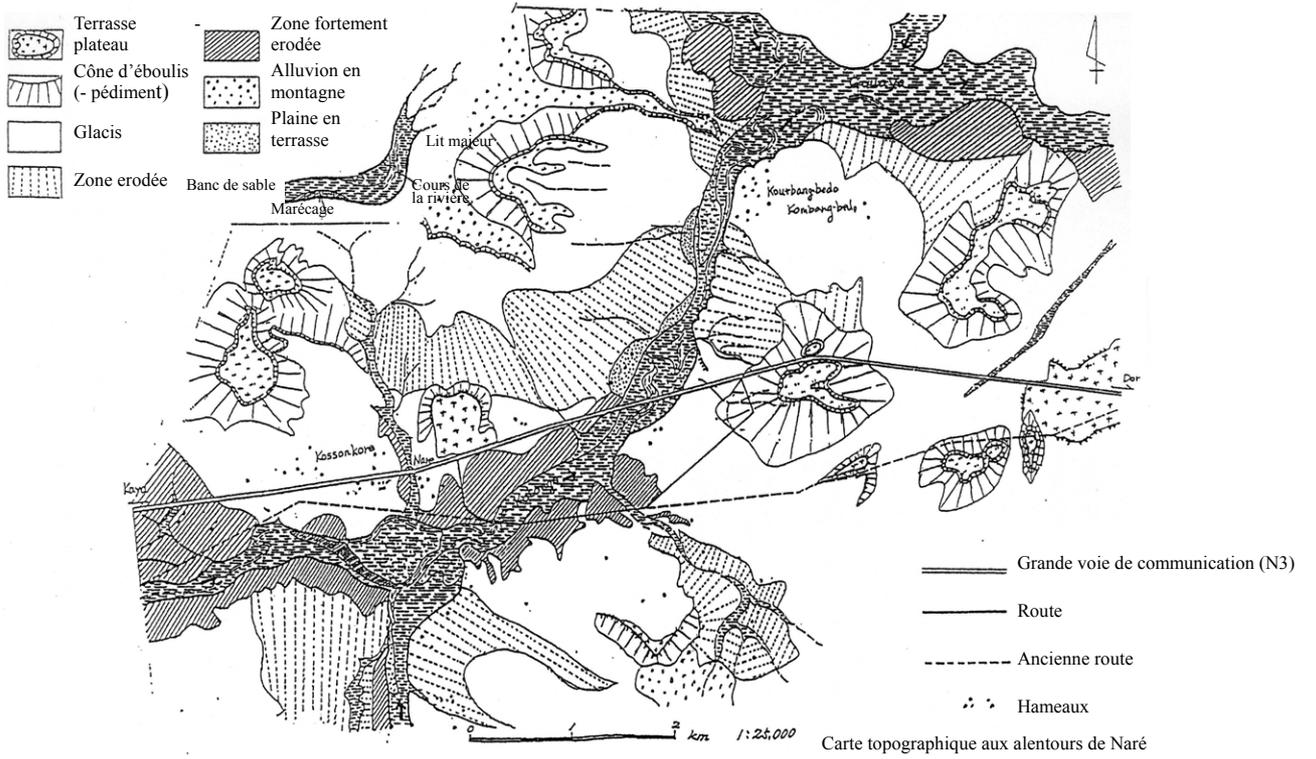


Figure 3.4: Exemple d'une carte basée sur des photos aériennes (alentours de Naré)

3-4-2. Etude de terrain

Sur les 5 sites ainsi retenues, une étude détaillée a été effectuée pour déterminer la possibilité de la mise en place du barrage souterrain, compte tenu également des résultats du sondage électrique mentionnées plus bas (voir la section 3-4-3).

Au cours de l'étude, détaillée, nous avons mené les investigations suivantes en vérifiant en même temps la répartition des villages.

(1) Vérification de la topographie et de la géologie

Nous avons étudié la topographie et la géologie des sites pour déceler la présence de nappes phréatiques et en estimer la structure.

Dans ces études, les schémas d'interprétation établies à partir des photographies aériennes servaient de carte topographique et de carte d'examen préparatoire. En effet, lorsqu'on mène l'étude terrain d'une région où les terrains plats dominant et qui ne sont pas couverte par des cartes topographiques de précision, il est parfois impossible de saisir la signification géomorphologique des phénomènes observés et même de se repérer sans avoir recours aux schémas d'interprétation ou aux photographies aériennes.

(2) Etude des puits existants

Afin de vérifier la présence de nappes phréatiques, les investigations indiquées ci-dessous ont été effectuées sur les puits existants. Ce sont surtout les puits non cuvelés qui nous ont apporté les renseignements les plus utiles.

- 1) Détermination des relations qui existent entre la localisation des puits, d'une part, et la topographie et la géologie du terrain, d'autre part
- 2) Mesure du niveau d'eau dans les puits
- 3) Collecte de renseignements auprès des habitants sur la fluctuation saisonnière du niveau d'eau souterraine
- 4) Observation des caractéristiques géologiques des aquifères et des formations qui les recouvrent à l'aide de l'examen de l'intérieur des puits et des déblais produits lors de leur forage ainsi que de l'enquête menée auprès des habitants

(3) Détermination de la distribution des sédiments non consolidés

Un effort particulier a été entrepris pour déterminer la distribution des sédiments non consolidés pouvant constituer des aquifères des nappes phréatiques. Lorsqu'il s'est avéré difficile de la déterminer directement, nous avons procédé à une étude minutieuse de l'affleurement du soubassement en particulier de la croûtes latéritique pour délimiter la zone d'affleurement du soubassement et en déduire la distribution des sédiments non consolidés.

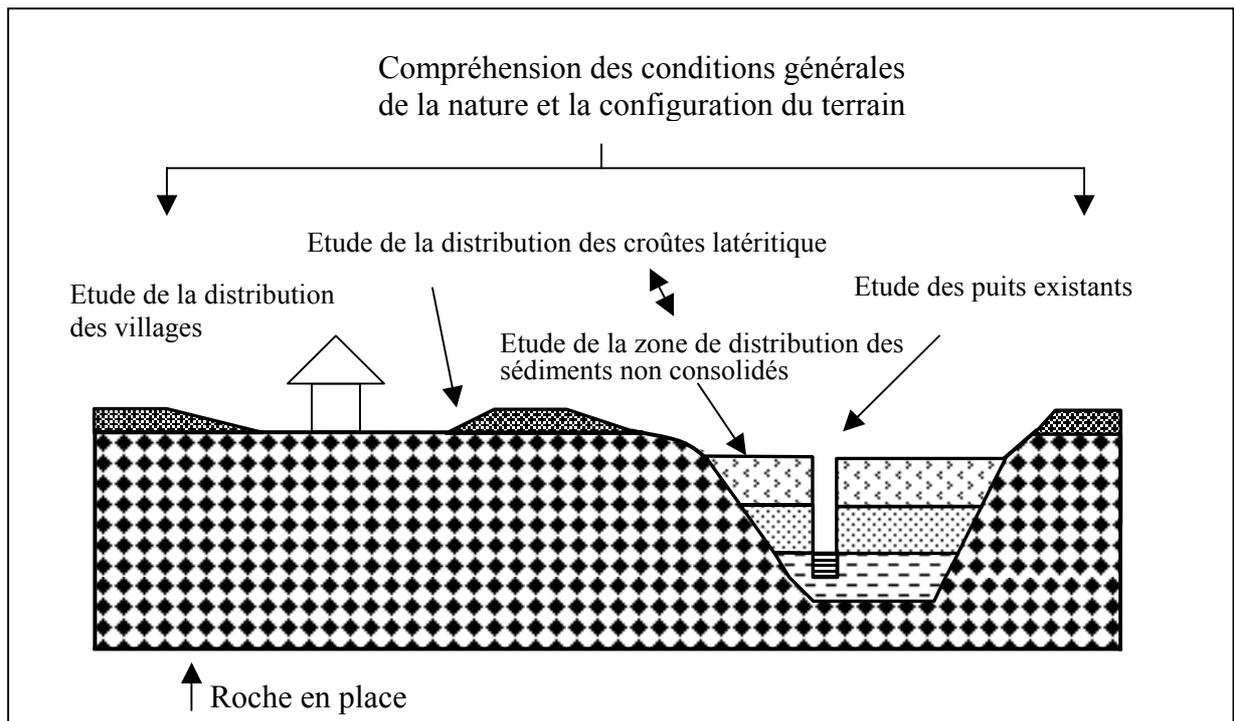


Figure 3.5: Points d'étude pour la reconnaissance

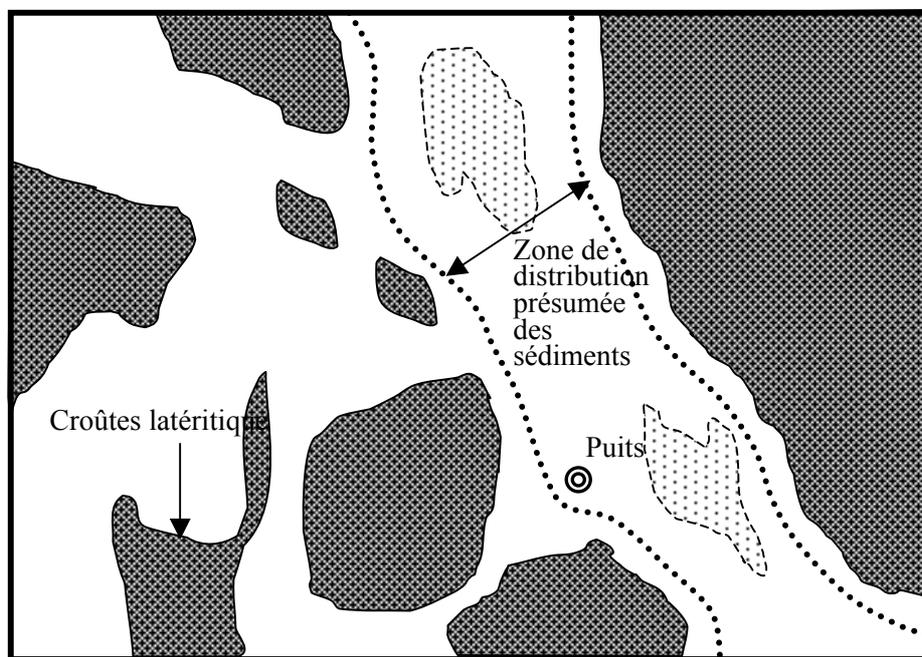


Figure 3.6: Relation entre la zone de distribution des croûtes latéritique et celle des sédiments non consolidés

3-4-3. Prospection géophysique

Sur les 5 sites retenus sur la base des résultats de la photo identification et de l'étude terrain, une sondage électrique a été également effectuée pour déterminer la structure du terrain.

Il est intéressant de noter que sur certains sites (villages de Tangapre et de Naré) une prostection magnétique a été également effectuée, dont les résultats n'ont fait que confirmer à une précision moins élevée ceux de la prospection électrique. Celle-ci est donc plus utile pour déceler la structure du sous-sol.

(1) Méthode du sondage électrique

La sondage électrique a été effectuée par sondage vertical suivant la méthode de quadripole (méthode Wenner). A partir de ses résultats, ont été établis des profils de résistivité pour étudier la structure du terrain. Un des profils de résistivité ainsi établis est donné sur la fig. 3.7.

Pour la prospection et l'analyse de ses résultats, les précautions suivantes ont été prises notamment en ce qui concerne le maillage de prospection.

- 1) Nous avons établi des lignes d'étude (d'une longueur de 150 à 500 m) de manière qu'elles traversent la structure supposée du sous-sol pour disposer des points où un profil de résistivité était à obtenir. Le long de ces lignes, la prospection électrique a été effectuée à un intervalle d'environ 50 à 100 m, soit 3 à 10 points d'étude par ligne.
- 2) A chaque point d'étude, une ligne de prospection a été établie de manière qu'elle soit parallèle à la direction dans laquelle la structure supposée du sous-sol s'étend.
- 3) Pour obtenir une vue tridimensionnelle de la structure du terrain tridimensionnelle, nous avons établis dans la mesure du possible 2 à 3 lignes d'étude (le long desquelles sont disposés les points où un profil de résistivité est à obtenir).
- 4) Les lignes d'étude ont été prolongées jusqu'à un affleurement du substratum ou à un point où se trouvait très certainement le substratum à une profondeur très faible, pour déterminer les résistivités du substatum (couche superficielle latéritique, couche d'altération forte, rocher recent). Ces résultats ont largement contribué à l'interprétation géologique des profils de résistivité.
- 5) Dans les zones où il y avait des puits (notamment des puits non cuvelés) permettant l'observation du niveau de la nappe et l'examen de sections du terrain, la prospection électrique a été également effectuée à proximité de ces puits pour déterminer les résistivités du terrain. De telles valeurs de résistivités permettent d'augmenter l'exactitude de l'interprétation géologique des profils de résistivité. La résistivité determine par l'analyse des resultants d'une prospection électrique reflète non seulement les propriétés électriques des roches et des sols constituent le terrain mais également celled des eaux souterraines qui y sont presentment. Elle peut ainsi varier sensiblement dans des formations constituées de matériaux identiques, s'il y a une grande différence de teneur en eau. La connaissance de la résistivité ne suffit donc pas pour determiner précisément la nature lithologique des matériaux constituents. Toutefois, le profil de résistivité établi à partir des resultats d'une prostection électrique effectuée en un grand nombre de points constitue un element

très utile d'appréciation de la structure géologique et du réserve d'eau souterraine, car la repartition des zones présentant une résistivité presque égale peut être considérée comme correspondent à celle des formations ayant une lithologie et une teneur en eau quasiment identiques.

(2) Sélection des sites, faite sur les résultats de la sondage électrique

L'étude terrain et le sondage électrique effectuées sur les 5 sites ont apporté des renseignements sur la structure du terrain de chaque site.

- a. Saouga (au sud de Gorom Gorom, Province de l'Oudalan)
Ce site renferme probablement une vallée fossile qui constitue des nappes phréatiques. Mais les travaux de construction nécessaires seraient trop importants pour un projet expérimental.
- b. Naré (au sud de Tougouri, Province du Namentenga)
Ce site renferme probablement une vallée fossile qui constitue des nappes phréatiques. Les travaux de construction nécessaires seraient un peu trop importants pour un projet expérimental. Mais c'est un site apte à l'emplacement d'un barrage souterrain.
- c. Louda (au sud de Kaya, Province du Sanmatenga)
Un relief circulaire y a été observé, mais aucun aquifère intéressant n'a été découvert.
- d. Bassneil (au nord de Korsimoro - 1, Province du Sanmatenga)
Un relief circulaire y a été observé, mais aucun aquifère intéressant n'a été découvert. Mais la couche de sédiments non consolidés qui pourrait constituer un réservoir est probablement très mince.
- e. Tangapore/Kossoden (au nord de Korsimoro - 2, Province du Sanmatenga)
C'est une partie rétréci située à l'aval du relief circulaire mentionné ci-dessus, où la présence de nappes phréatiques est suggérée par les résultats de l'étude des puits existants. Les profils de résistivité indiquent également la présence possible d'une vallée fossile d'une taille approprié à un projet expérimental et donc apte à l'emplacement d'un barrage souterrain.

Parmi ces 5 sites, ont été donc retenus 2 sites intéressants pour la réalisation du barrage souterrain : le village de Tangapore, arrondissement de Korsimoro, Province du Sanmatenga ; le village de Naré, Département de Tougouri, Province du Namentenga.

La quantité des opérations du sondage électrique effectuées sur ces 2 sites est la suivante :

- à Tangapore : 58 points sur 4 lignes d'étude
- à Naré : 95 points sur 6 lignes d'étude

Résultats du sondage électrique et niveau de la nappe phréatique
présumé par le niveau de l'eau des puits d'alentour

Grande voie de communication
entre Ouagadougou et Kaya

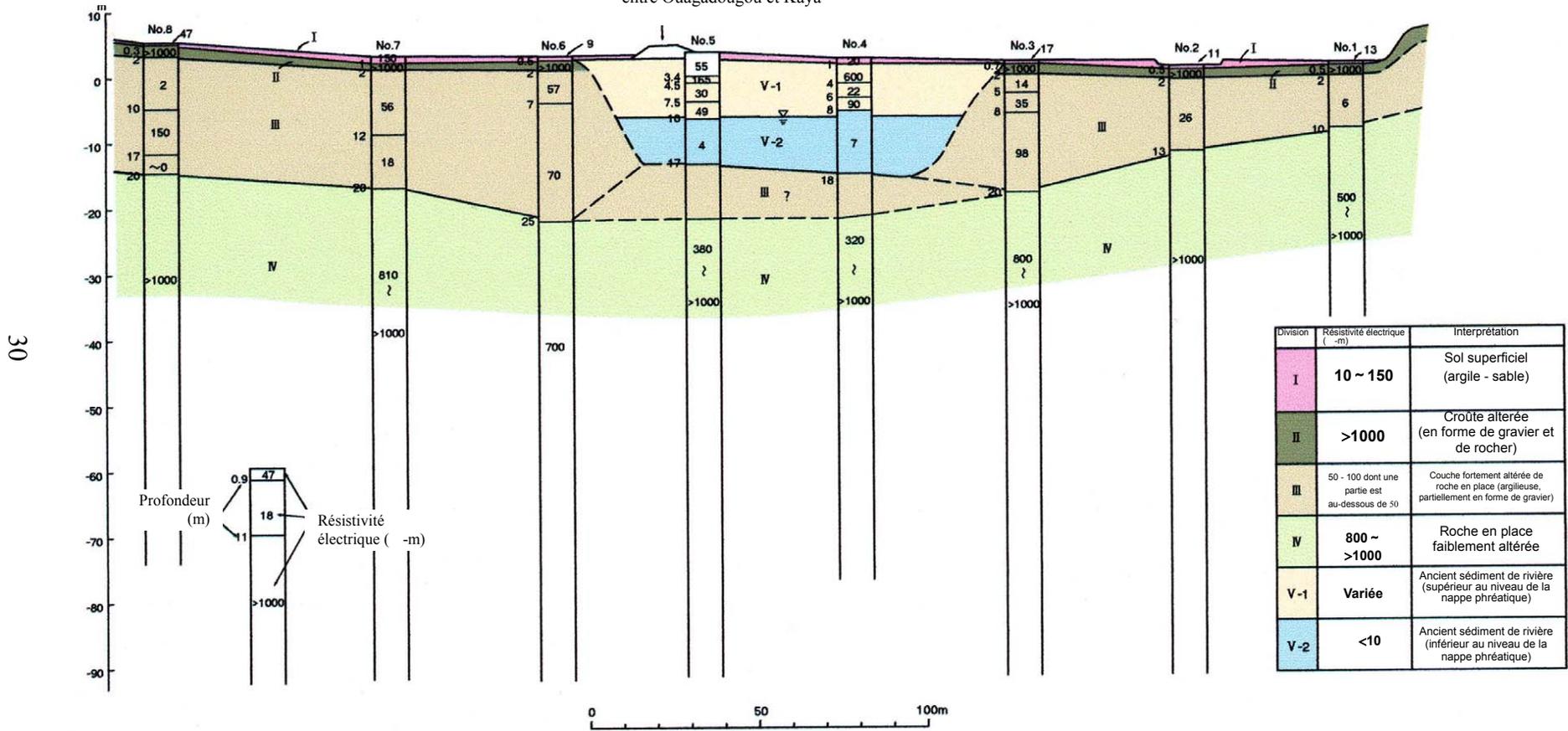


Figure 3.7-1: Résultats du sondage électrique au nord de Korsimoro - point C (Tangapore)

Figure 3.7: Profil de résistivité électrique basé sur les résultats du sondage électrique

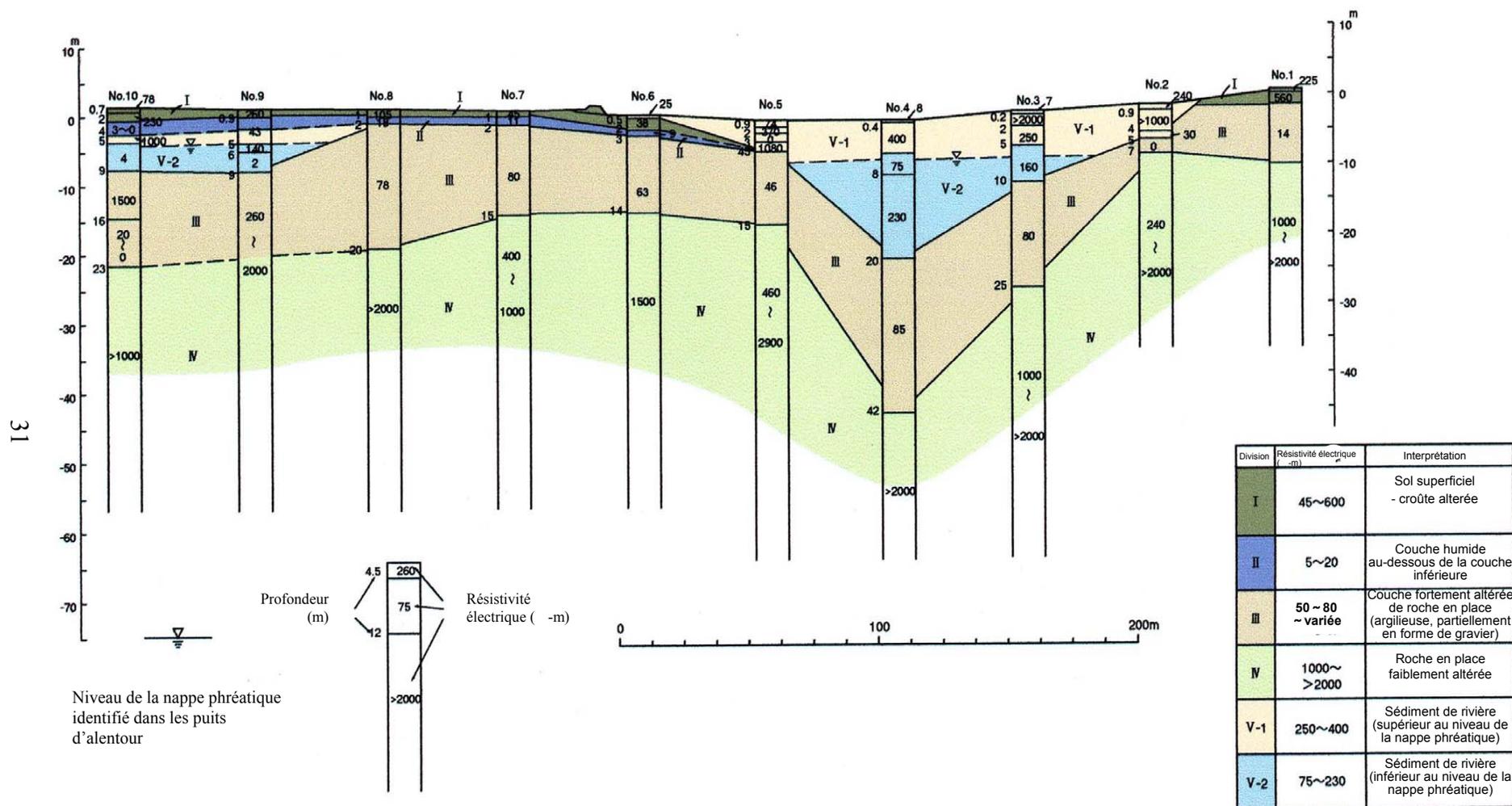


Figure 3.7-2: Résultats du sondage électrique au point Kouli k are (Naré)

3-5. Investigations détaillées sur le terrain (test géologique de forage, test de perméabilité, observations de la nappes phréatiques)

Sur les deux sites (Tangapore et Naré) choisis sur la base des résultats de la reconnaissance et de la prospection électrique, les investigations détaillées suivantes ont été effectuées pour vérifier la structure du terrain, définir les caractéristiques hydrauliques et estimer la pluviométrie sur le bassin versant.

- Sondages de reconnaissance
- Essais de perméabilité dans les sondages
- Observations du niveau d'eau dans les sondages

Parallèlement à ces investigations, ont été effectuées une observation météorologique (voir la section 6-2) et une étude socio-économique (voir la section 3-5).

(1) Sondages de reconnaissance

Afin de vérifier la structure du terrain estimée sur la base des résultats de la prospection électrique, des sondages de reconnaissance ont été exécutés le long des lignes d'étude de la prospection électrique.

Dans le présent projet, des sondages ont été forés à l'aide d'un matériel destiné aux puits profonds et des échantillons de déblais prélevés au cours du forage ont servi à déterminer la structure géologique. Mais il était difficile en particulier de distinguer les parites fortement altérées du substratum (parties argilisées) et les couches argileuses à limoneuses des alluvions. Il est donc préférable d'utiliser, pour au moins la moitié du nombre des sondages à exécuter, le matériel de sondage destiné à l'étude géologique et permettant d'obtenir des échantillons non remaniés.

La quantité des sondages de reconnaissance est la suivante :

- à Tangapore : 3 sondages d'une profondeur de 60 m, 3 sondages d'une profondeur de 20 m
- à Naré : 2 sondages d'une profondeur de 60 m, 19 sondages d'une profondeur de 20 m

(2) Essais de perméabilité dans les sondages

Afin de déterminer la perméabilité du terrain, des essais de perméabilité ont été effectués dans les sondages de reconnaissance.

Ces essais consistaient à injecter de l'eau dans les sondages à l'aide d'un camion-citerne ou de jerricans et à observer ensuite la vitesse du rabattement pour obtenir le coefficient de perméabilité du terrain en fonction de la profondeur. Les essais de perméabilité ont été effectués dans :

- 3 sondages à Tangapore
- 12 sondages à Naré

(3) Observations du niveau d'eau dans les sondages

Afin de déterminer la variation saisonnière des nappes phréatiques, l'observation du niveau d'eau a été effectuée (dans 3 sondages à Tangapore et dans 5 à Naré).

La mesure du niveau d'eau a été exécutée irrégulièrement au moyen d'un limnimètre manuel à Tangapore, alors qu'à Nara, elle s'est faite de façon continue à l'aide d'un limnigraphe.

L'observation a été effectuée pendant environ 6 mois jusqu'au choix définitif de l'emplacement du barrage souterrain (du milieu de la saison des pluies à la première moitié de la saison sèche). Mais une observation plus longue serait désirable, étant donné la variation considérable tant saisonnière qu'annuelle du niveau des nappes phréatiques. Par ailleurs, comme on le verra dans la section 6-4, il y a toujours un risque de prendre le niveau de la nappe suspendue pour celui de la nappe phréatique. Une attention particulière doit donc être accordée aux méthodes d'observation.

Sur la base des résultats des sondages de reconnaissance, des essais de perméabilité et des observations du niveau d'eau, les caractéristiques hydrogéologiques des 2 sites possibles, Tangapore et Nara, sont estimées comme ce qui suit (voir également les fig. 3.9 et 3.10) :

Tangapore

Les résultats de la prospection électrique suggèrent la présence d'une vallée fossile. Mais les sondages de reconnaissances n'ont pas découvert de sédiments de vallée fossile (alluvions). A l'intérieur et à l'extérieur de la vallée fossile supposée, les caractères géologiques du terrain sont identiques et la nappe phréatique est presque au même niveau avec une variation saisonnière quasi concomitante. En bref, entre ces deux milieux, il n'y a pas de différence géologique nette et la continuité hydraulique est pratiquement assurée. Il en ressort qu'il n'y a pas de vallée fossile.

Si les résultats de la prospection électrique suggèrent sa présence, c'est sans doute parce que le substratum renferme une zone de fraction d'une grande dimension.

Naré

Les résultats de l'examen des déblais de forage des puits existants, de la prospection électrique et des sondages de reconnaissance ont tous confirmé la présence d'une vallée fossile dans le sous-sol au-dessous de la rivière Kolongo. Le coefficient de perméabilité déterminé par les essais de perméabilité est de 10^{-3} à 10^{-4} cm/sec à l'intérieur de la vallée fossile et de 10^{-5} à 10^{-6} cm/s dans le terrain de ses versants, ce qui prouve que les sédiments de la vallée fossile sont fermés par un substratum peu perméable. D'autre part, la présence d'eau souterraine a été constatée dans la vallée enfouie, alors qu'à l'extérieur de celle-ci, elle n'a pas été observée. On peut en déduire que la vallée fossile constitue un chenal pour l'eau souterraine.

Les résultats de l'observation du niveau d'eau dans la vallée fossile montrent une certaine variation saisonnière entre la saison des pluies et la saison sèche, ce qui indique un écoulement significatif de la nappe phréatique.

Les résultats des investigations détaillées sur le terrain sont donnés de manière schématique sur les fig. 3.8 et 3.9.

L'emplacement possible du barrage souterrain, c'est-à-dire la partie rétrécie de la vallée fossile, se situe sur la rivière Kolongo à l'amont immédiat du confluent de celle-ci et de la rivière Gouaya. Le risque est donc faible que la construction du barrage entraîne un "tarissement en aval des eaux souterraines".

Tous ces résultats montrent que le village de Naré est le meilleur site pour la construction du barrage souterrain du point de vue hydrogéologique.

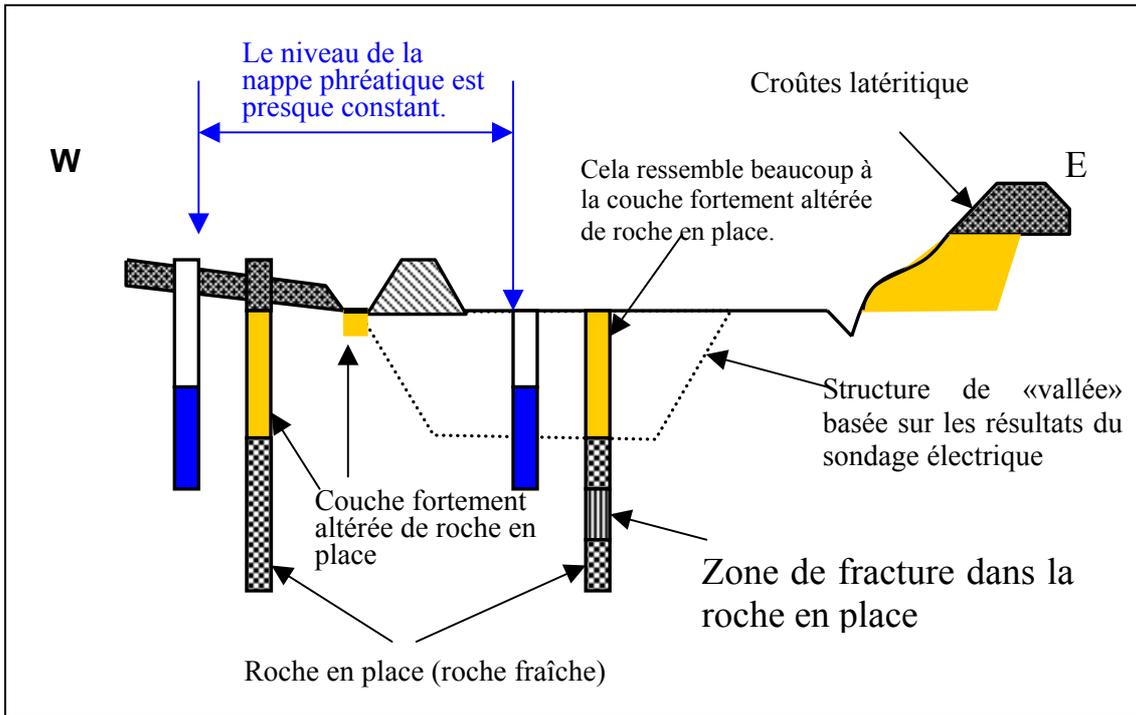


Figure 3.8: Croquis schématique des résultats de l'étude détaillée à Tangapoore

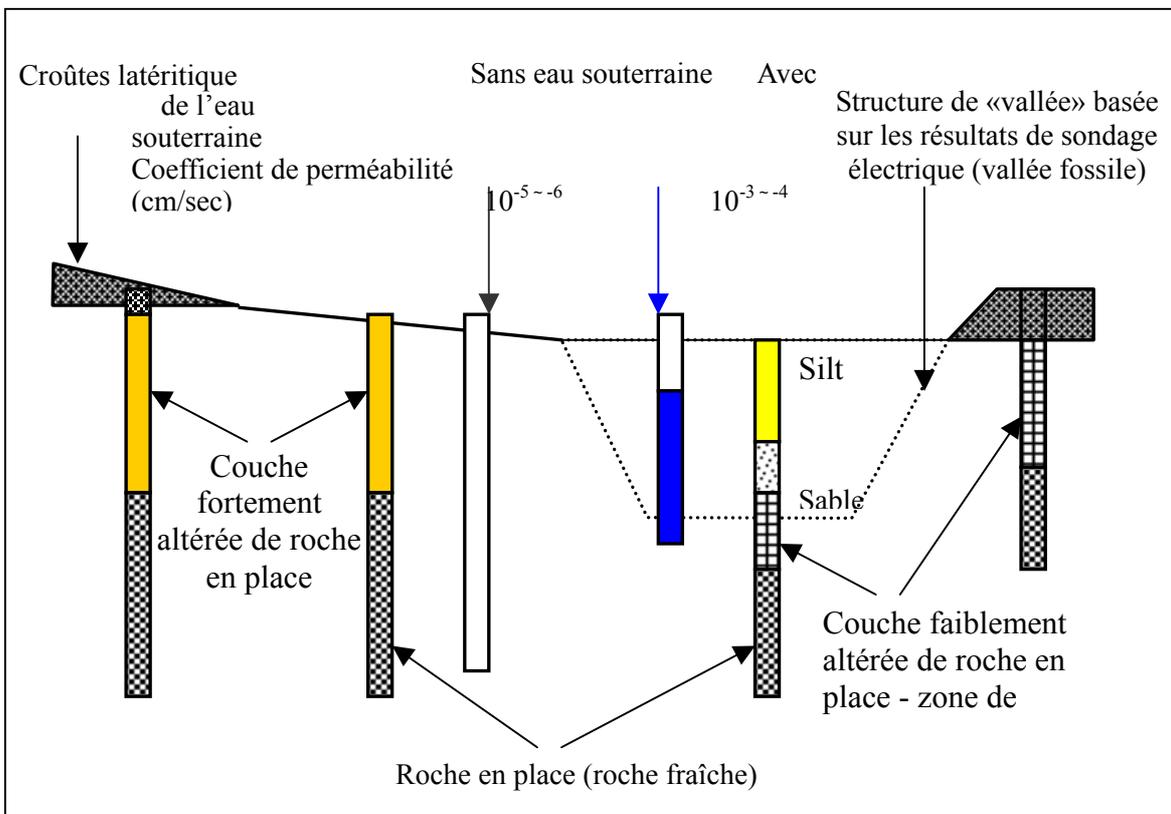


Figure 3.9: Croquis schématique des résultats de l'étude détaillée à Naré

3-6. Etude socio-économique

Au cours de la recherche de sites, une étude socio-économique a été également menée à Tangapore et à Naré, dont les résultats sont donnés brièvement ci-dessous.

Tangapore

- Population : 2.079 habitants dans leur totalité Mossis
- Equipements collectifs : une école primaire (créée en 1995), aucun dispensaire
- Activités principales : l'agriculture avec l'élevage comme activité secondaire. Le commerce est aussi activement pratiqué au marché (à Korsimoro).
- Maladies fréquentes : méningite, ophtalmie, céphalalgie, tumeur, diarrhée
- Précipitation moyenne annuelle : 660 mm environ jusqu'en 1995

Situé dans la zone de transition entre une basse montagne et une pénéplaine, le village met en culture non seulement la pénéplaine mais aussi le flanc en pente douce de la montagne et exploite les terres arables presque à la limite de leur disponibilité. Avec l'emploi des engrais chimiques sur une partie des terres, le taux d'autosuffisance alimentaire s'élève à plus de 90%. Vu la situation où il ne reste plus de terres cultivables avec en plus la progression de la dégradation des sols, le village risque pourtant de souffrir d'une grave manque de vivres dans un proche avenir à la suite de l'accroissement démographique. Il est donc primordial d'augmenter la productivité des terres et de procéder, à cet effet, à une nouvelle exploitation des ressources en eau.

L'élevage pratiqué comme activité secondaire sert à assurer une "réserve" pour satisfaire un besoin urgent en cas de sécheresse par exemple. Mais la superficie réduite du pâturage et la manque d'eau pour l'abreuvement en saison sèche constituent un handicap pour cette activité.

Les villageois disposent de 3 pompes à main, de 6 puits artésiens, de 1 micro-barrage et de 6 bassins qui ne satisfont cependant que 70% environ de leurs besoins en eau à usage domestique (20 litres par personne). L'eau de la retenue du micro-barrage et des bassins, destinée aux animaux d'élevage, est également utilisée à des fins domestiques et cause, par sa mauvaise qualité, parfois des maladies. Pour y remédier également, une nouvelle exploitation des ressources en eau est nécessaire.

Certains jeunes villageois forment un groupe pour entreprendre la modernisation des pratiques agricoles. Leurs activités, telles que le compostage et la culture maraîchère, sont pourtant freinées par le manque d'eau. Celle-ci empêche par ailleurs le reboisement qu'on essaie de promouvoir dans le cadre du programme de l'école primaire. Cependant, la bonne volonté et l'intérêt que les habitants témoignent ainsi et l'expérience dont ils disposent faciliteraient leur participation à la réalisation du présent projet visant principalement une meilleure utilisation des ressources en eau souterraine.

Naré

- Population: 2.896 habitants dans leur grande majorité Mossis, avec Peuls en minorité
- Equipements collectifs: une école primaire (créée en 1996), aucun dispensaire
- Activités principales: l'agriculture avec l'élevage comme activité secondaire (activité principale pour les Peuls)
- Maladies fréquentes: le dracunculose ver de guinée, l'ophtalmie, la dysenterie, la méningite
- Précipitation moyenne annuelle: 590 mm environ jusqu'en 1995

Le village est caractérisé par une pénélaine qui domine avec partiellement de petits "monadnocks" et par la rivière Kolongo, affluent de la rivière Gouaya faisant partie du bassin fluvial du Niger, qui le traverse. La rivière Kolongo est un "oued", cours d'eau temporaire qui n'apparaît qu'en saison des pluies.

La pénélaine et les basses terres longeant la rivière Kolongo (dont une partie se trouve sur les champs inondables) sont en mises en culture. Mais les terres agricoles ne représentent que 12% du territoire, laissant une superficie importante exploitable. Les forêts ne recouvrent que 2% du territoire. Les terres nues qui occupent actuellement environ 20% de la superficie totale du village étaient jadis en majeure partie des terres cultivées, ce qui signifie que la détérioration des sols progresse à la suite du défrichage des broussailles et des forêts.

Les terres cultivées sont en général peu fertiles. N'utilisant presque ni engrais ni composte, le village de Naré ne peut enregistrer qu'un faible taux d'autosuffisance de l'ordre de (ou inférieur à) 60%, ce qui en fait un des villages les plus pauvres du Burkina Faso. On y voit beaucoup d'animaux d'élevage (notamment des bovins) dont la plupart appartient aux éleveurs Peuls. Peu d'habitants Mossis élèvent des animaux en nombre suffisant pour constituer une "réserve" qui puisse satisfaire leur besoin urgent en cas de sécheresse par exemple.

Le village n'est pas bien équipé pour alimenter en eau les habitants, avec seulement 1 pompe à main et 5 puits artésiens avec un rebord en béton. Cet équipement ne permettant de satisfaire que 60% ou moins du besoin, la majorité des villageois doivent recourir à la rivière en saison des pluies et, en saison sèche, aux puits non cuvelés, forés dans les champs inondables, pour s'assurer de l'eau à l'usage domestique. D'où une morbidité importante due aux maladies causées par une eau polluée, telles que la dracunclose. Nombreux sont les habitants désirant pratiquer la culture maraîchère pour s'assurer contre le manque de vivres et également pour obtenir des revenus en espèces. Mais dans ces conditions qui ne permettent même pas de se procurer une quantité suffisante d'eau à l'usage domestique, il n'y a qu'une famille qui cultive des légumes.

Dans cet état des choses, les habitants de Naré expriment un désir ardent d'une exploitation des ressources en eau. Mais comme ils ne disposent pas de renseignements nécessaires sur l'amélioration des conditions de vie et le développement rural, la participation des habitants au projet expérimental serait difficile.

Les résultats de l'étude socio-économique montrent ainsi que le village de Tangapore est plus apte à accueillir le projet.

Cependant, comme on l'a vu dans la section 3-4, c'est à Naré que se trouve la structure hydrogéologique la plus appropriée à l'emplacement du barrage souterrain. Nous avons finalement retenu le village de Naré pour réaliser le présent projet expérimental, compte tenu de la priorité donnée à la possibilité de construction du barrage souterrain.

4. Construction du barrage souterrain

4-1. Methodes de construction du barrage souterrain

Les différentes techniques de construction du barrage souterrain sont données sur le tableau 4.1.

On connaît déjà plusieurs exemples de barrage souterrain construit dans certains pays, dont le Japon. La plupart de ces ouvrages ont été réalisés par la technique dite "parafouille par paroi moulée dans le sol". Le barrage souterrain consiste en principe à retenir de l'eau souterraine avec un "parafouille" et peut donc être construit par l'une des techniques de parafouille la plus appropriée aux conditions locales.

Table 4.1: Types des méthodes de construction du barrage souterrain

Catégorie	Type de méthode de construction	Méthode de construction et structure	Caractéristiques
Application de la méthode de paroi moulée d'étanchéité souterrain	Mur en palplanches d'acier	Construction continue des murs en palplanches d'acier	C'est convenable au sol faible, mais difficile à réaliser sur la couche graveleuse et la roche en place.
	Mur en palplanches de tube d'acier	Construction continue des murs en palplanches de tube d'acier	
	Paroi moulée	Mur de béton armé coulé sur place	Il y a des méthodes diverses en fonction des conditions du sol et elles ont toutes besoin des matériels d'une haute technicité.
	Paroi moulée de type colonne	Paroi consistant en des pieux en mortier continuellement coulés sur place	C'est une méthode adoptée pour construire le barrage souterrain à l'île de Miyako au Japon. Elle est besoin des matériels d'une haute technicité.
Application de la méthode d'amélioration du sol	Méthode d'injection	Injection de mortier à travers des forages réalisés par intervalles	Cette méthode a été partiellement adoptée dans la construction du barrage souterrain à l'île de Miyako. Elle est largement applicable parce que les petits et moyens matériels sont utilisables, mais un peu difficile à constater l'effet d'étanchéité.
Application de la méthode générale de construction du barrage	Méthode de construction du barrage en béton	Structure construisant un barrage en béton sous terre ou à moitié sous terre (excavation / construction du corps du barrage / remblai)	C'est convenable au barrage souterrain de type «barrage en torrent» dont le haut est au-dessus du sol (il y a des exemples dans les pays comme le Kenya). Les frais des travaux sont plus élevés que ceux du barrage souterrain de type «barrage en terre», en plus, des mesures contre la fuite d'eau sont nécessaires. Mais, pour l'excavation profonde, les frais seront trop élevés.
	Méthode de construction du barrage en terre	Structure construisant un barrage en terre (digue en terre) sous terre	C'est une méthode adoptée pour ce projet. Ce type de barrage peut être construit par des matériels de travaux publics ordinaires et le contrôle des travaux est également facile. Cependant, des mesures contre la fuite d'eau sont nécessaires et pour l'excavation profonde, les frais seront trop élevés.

Dans le présent projet à Naré, nous avons retenu la technique de "barrage en terre" indiquée au bas du tableau 4.1 pour les raisons suivantes :

- 1) La "vallée fossile" se trouve enfouie en faible profondeur (environ 8 m au-dessous de la surface) et l'écoulement des eaux souterraines est quasi absent en saison sèche. Il est donc possible d'y appliquer cette technique.
- 2) Cette technique ne nécessite pas d'engins mécaniques sophistiqués et permet d'exécuter les travaux avec le matériel disponible au Burkina Faso.
- 3) Le coût des travaux, y compris le transport et la location du matériel, est le moins élevé.

4-2. Specificités du barrage souterrain construit à Naré

Les caractéristique du barrage souterrain construit à Naré dans le cadre du présent projet sont les suivantes :

(1) Emplacement

Dans la vallée fossile se trouvant dans le quartier de Koulikara, village de Naré, Département de Tougouri, Province de Namentenga, Burkina Faso

(2) Structure du corps du barrage

"Barrage souterrain en terre" (voir fig. 4-1)

- Profondeur de la base : 3,0 m à 11,4 m au-dessous de la surface (hauteur maximale du barrage : 8,4 m)
- Longueur en crête : 216,3 m
- Largeur (épaisseur) : 8,6 m à la base, 3,0 m en crête
- Volume : 7.144 m³
- Matériaux de remblais : limon argileux (couche d'altération forte du substratum)
- Coefficient de perméabilité : 10^{-7} à 10^{-8} cm/sec (en partie très réduite, 10^{-6} cm/sec)

A la base du barrage dans la zone amont, a été réalisé une "clé déncrage" de 3 à 4 m environ de largeur et de 1,5 m de profondeur (ressaut pratiqué dans le substratum et remblayé) pour protéger la base. Juste au-dessus de la crête, une couche d'environ 1 m d'épaisseur constituée de graviers de diamètre similaire a été mise en place le long de la ligne de niveau pour assurer une bonne perméabilité.

(3) Source de la retenue du barrage souterrain

L'eau phréatique peu profonde se trouvant au sein de la vallée fossile enfouie dans le bassin de la rivière Kolongo, affluent de la rivière Gouaya fait partie du bassin fluvial du Niger.

(4) Dimensions de la retenue

- Etendue maximale de la retenue : longueur de 13,4 km environ, largeur moyenne de 150 m environ (la plus basse estimation), superficie de 2 km² environ
- Volume de la couche-réservoir : 9.000.000 m³ environ (estimation)
- Capacité de stockage : 1.800.000 m³ environ (estimation)

(5) Quantité des travaux

- Excavation : excavation du sol : 51.213 m³, excavation du rocher : 4.377 m³, au total 55.590 m³

- Remblais à haute densité (corps du barrage) : 7.144 m³
- Remblais à moyenne densité (à l'amont et à l'aval du barrage) : 26.662 m³
- Remblais à basse densité (au-dessus du barrage) : 21.814 m³

(6) Engins mécaniques

- Buteur : 2 à 3 unités
- Pelle mécanique : 1 à 2 pelles mécaniques
- Camion : 2 à 3 camions-bennes
- Rouleau : 1 à 2 unités (Komatsu JV100)

(7) Durée des travaux

Du 15 novembre 1997 à la fin de juin 1998, dont environ 4,5 mois ont été effectivement consacrés à la construction du barrage souterrain, les travaux pour les autres ouvrages de l'aménagement expérimental ont été également exécutés pendant cette période.

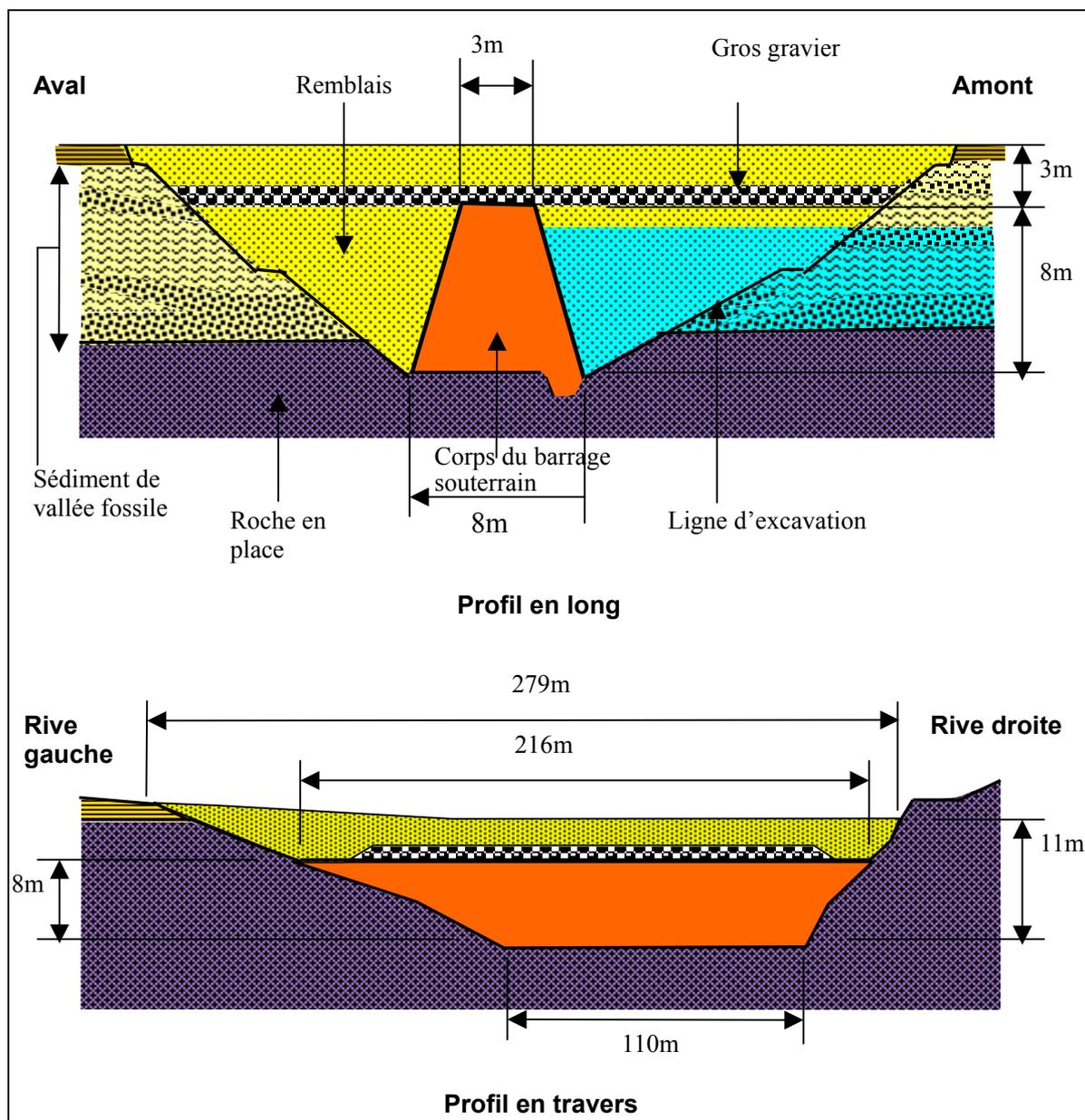


Figure 4.1: Croquis de la structure du barrage souterrain

4.3 Travaux de construction du barrage souterrain

(1) Excavation

La construction d'un barrage souterrain nécessite une excavation beaucoup plus importante que la taille (longueur, largeur, profondeur) de son corps. L'excavation pour construire des routes de chantier est également nécessaire.

Dans le cas du barrage souterrain construit à Naré, l'excavation était d'une ampleur suivante :

- Longueur : 307,1 m (y compris l'excavation pour les routes de chantier)
- Largeur : 50 m au maximum
- Profondeur : 12,9 m au maximum
- Quantité totale d'excavation : 55.590 m³

La quantité totale s'est ainsi élevée à 7,8 fois plus importante que le volume du barrage.

Au cours des travaux d'excavation, nous avons rencontré les difficultés suivantes :

- 1) L'excavation a été exécutée pendant la saison sèche où la nappe phréatique était à un niveau bas dans la vallée fossile. Mais les travaux se sont heurtés à des difficultés dues aux venues d'eau en provenance des couches sableuses se trouvant à une profondeur intermédiaire dans les sédiments de la vallée fossile ou de la partie séparant les sédiments et le substratum. Dans ce genre de travaux, les venues d'eau n'étant pas rares, il faut porter une attention particulière au choix des moyens techniques et de l'époque appropriée pour exécuter les travaux.
- 2) L'enfouissement de la vallée fossile s'est avéré, sur la rive droite, comme ce qui était estimé par les études préalables, mais sur la rive gauche, la vallée s'étendait au-delà de la limite estimée. Comme le montre le présent cas, les résultats des études préalables ne sont pas toujours fiables. La participation de géologues expérimentés à la supervision des travaux est donc très importante.

(3) Remblais

Pour les ramblais du corps du barrage, ont été utilisés des matériaux extraits de la couche d'altération forte (limon argileux) se trouvant à 300 m environ de l'emplacement du barrage.

Préalablement aux travaux, des remblais d'essai ont été effectués avec les matériaux prévus sur le chantier afin d'établir les standards de contrôle de qualité :

- Epaisseur d'épandage d'une couche : 30 cm
- Epaisseur d'une couche finie : 25 cm
- Nombre de passages du rouleau : 6 passes (aller et retour) au rouleau Komatsu JV100
- Teneur en eau des matériaux avant le remblayage : Teneur optimale en eau $\pm 1\%$
- Densité sèche du remblai fini : supérieure à 90% de la densité maximum
- Coefficient de perméabilité du remblai fini : inférieur à 10⁻⁵ cm/sec

A la suite de l'excavation exécuté jusqu'au substratum de la vallée fossile, les travaux de remblai pour le corps du barrage ont été exécutés avec le contrôle de qualité effectué selon les standards indiqués ci-dessus.

- Essais pour déterminer la teneur en eau des matériaux : en 130 points au total sur 52 couches
- Essais pour déterminer la densité sèche du remblai : en 130 points au total sur 52 couches

- Mesures du coefficient de perméabilité du remblai : en 38 points au total sur 12 couches

Les résultats du contrôle de qualité étaient bons, le remblai étant jugé acceptable en tous les points contrôlés. Le coefficient de perméabilité de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-8} cm/sec (10^{-6} cm/ sec en 2 points seulement sur 38) était bien meilleur que la valeur requise.

Il convient de rappeler que les pieds et la base du barrage doivent être enfoncés dans le substratum de la vallée fossile pour empêcher les fuites éventuelles.

Comme on l'a vu plus haut, les matériaux du remblai proviennent de la couche d'altération forte du substratum, se trouvant à 300 m environ de l'emplacement du barrage. Mais les déblais en provenance de la fouille se sont avérés plus tard utilisables pour les remblais. Un tel réemploi de déblais permet de réduire la superficie des "terres remaniées" par la construction d'un barrage souterrain. Pour les projets futurs de "barrage souterrain en terre", il est donc recommandé d'étudier minutieusement la nature du terrain de l'emplacement du barrage en tenant compte également de la possibilité de réemploi des déblais.

(3) Remblais de la fouille

Parallèlement à l'édification du massif en terre, ont été exécutés les travaux de remblai pour reboucher la fouille à l'amont et à l'aval du barrage. Le compactage des remblais a été assuré par 3 passes (aller et retour) au rouleau Komatsu JV100.

Les remblais ont été d'abord exécutés jusqu'au niveau de la crête du barrage. Ensuite, afin d'obtenir une bonne perméabilité, a été exécutée la mise en place d'une couche d'environ 1 m d'épaisseur de graviers de diamètre similaire, suivie par des remblais additionnels (avec 3 passes au rouleau).

Le corps du barrage étant exécuté avec les matériaux d'emprunt, il restait, à la fin des travaux de remblai, des déblais en quantité presque équivalente au volume du barrage. Ces déblais ont été utilisés pour reboucher la zone d'emprunt.

(4) Aménagement après les travaux

Une fois achevés les travaux de remblai, le terrain du chantier a été pratiquement remis en état. Mais la reconstitution de la végétation naturelle était tellement lente que le terrain est resté dénudé pendant environ deux années qui ont suivi les travaux. Pour le protéger contre le broutement éventuel par des animaux d'élevage, un grillage a été installé autour du terrain où ont été ensuite plantés des *Acacia senegal* en 2001. Le taux de prise de racine n'était que de 60% environ (en janvier 2002), mais avec un regain appréciable de sa couverture végétale naturelle, l'ancien chantier présente aujourd'hui l'aspect d'un forêt d'arbrisseaux.



Photo 4.1: Travaux de construction du barrage souterrain - 1



Photo 4.2: Travaux de construction du barrage souterrain - 2



Photo 4.3: Travaux de construction du barrage souterrain - 3



Photo 4.4: Travaux de construction du barrage souterrain - 4

5. Caractéristiques de la "vallée fossile" à Naré

L'excavation exécutée à Naré pour la construction du barrage souterrain a mis en vue une section entière de la "vallée fossile" et permis ainsi d'en étudier minutieusement la structure. Les vallées fossiles se trouvent fréquemment en Afrique occidentale, en particulier dans le bassin fluvial du Niger où avaient déjà été effectués quelques sondages de reconnaissance. Mais le présent projet constitue sans doute le premier exemple d'examen direct de la structure d'une vallée fossile, rendu possible par une fouille à pleine section.

Les renseignements ainsi obtenus à l'emplacement du barrage souterrain sont donnés ci-dessous. Voir aussi la coupe géologique de la vallée fossile indiquée sur la figure 5.1.

(1) Fôme de la "vallée fossile"

La vallée fossile découverte a une longueur de 130 m environ à son fond et de 180 m environ en haut de ses versants. Le fond de vallée n'est pas plat, mais légèrement ondulé en forme de "W". Sa profondeur varie de 5,9 m environ dans la zone centrale à 8,3 à 8,5 m environ dans la partie la plus profonde.

Le versant droit est relativement raide avec une pente de 30 degrés, alors que le versant gauche est incliné de 9 à 10 degrés environ.

Cette vallée fossile est estimée enfouie le long de la rivière Kolongo.

(2) Caractéristiques des "sédiments de la vallée fossile"

Les sédiments qui recouvrent la vallée fossile (sédiments de la vallée fossile) sont classés grosso modo en catégories suivantes :

1) Alluvions des champs inondables actuels

Ils constituent la strate superficielle formée probablement par des dépôts de débordement du cours d'eau actuel. Cette strate d'une épaisseur générale de 0,3 à 0,7 m est composée principalement d'argiles, de sables et de sol humifère avec par endroits l'affleurement des sédiments de la vallée fossile qu'elle recouvre.

2) Strate supérieure de sédiments de la vallée fossile

Il s'agit des sédiments argileux à limoneux s'étendant juste au-dessous des alluvions jusqu'à une profondeur de 4 à 5,5 m environ. Cette strate renferme des couches sableuses en forme de ruban ou de lentille d'une épaisseur de 0,5 à 1 m environ, à partir desquelles est venue une grande quantité d'eau lors de la construction du barrage souterrain et a empêché pendant un moment les travaux d'excavation.

3) Strate inférieure de sédiments de la vallée fossile

Cette strate qui s'étend depuis une profondeur de 4 à 5,5 m au-dessous de la surface des sédiments de la vallée fossile jusqu'au fond de la vallée (sauf une partie) est constituée principalement de couches de sable, de gravillon, de limon et de lignite. Ces couches se distinguent par leurs limites relativement nettes, mais chacune présente une structure allant de "interfinger" à polyédrique. Les couches de sable présentent partiellement une stratification croisée. Les gravillons et les gros sables semblent provenir en majeure partie de la concrétion oolitique de la couche superficielle latéritique.

Dans cette strate inférieure, se trouve par endroits une pénétration en forme de "interfinger" de la couche sableuse ou limoneuse classée en catégorie de strate supérieure. La distinction entre la strate supérieure et la strate inférieure n'est donc pas très rigoureuse.

4) Strate basale de sédiments de la vallée fossile

Entre la strate supérieure et le substratum, se trouve interposée par endroits une strate de roches de vase dures qui présente une discordance nette avec la strate inférieure et subit une "lapidification" avancée. Il convient donc de penser qu'elle date de bien plus longtemps que la strate inférieure.

Dans la partie inférieure de cette strate basale, est observée la présence d'un galet sub-anguleux qui est probablement un reste du dépôt d'alluvions constitué à une époque où la vallée fossile était formée par une puissante action érosive de l'ancien cours d'eau.

5) Soubassement

Le fond et les versants de la vallée fossile sont constitués par un substratum (roches anciennes) qui, composé de granites, de diorites, d'amphibolites, de roches sédimentaires légèrement métamorphisées, présente l'aspect de roches contaminées. Le substratum sur la rive droite de la vallée est recouvert d'une couche superficielle latéritique dure d'environ 3 m d'épaisseur.

Le substratum du fond de la vallée fossile est marqué par une faille (zone argillisée d'une largeur de 0,5 m environ) légèrement oblique par rapport à la direction dans laquelle s'allonge la vallée fossile. Au voisinage de cette faille, se trouvent également des zones fracturées ou fortement argillisées.

(3) Différence de caractéristiques hydrauliques entre diverses couches constituantes de la vallée fossile

Le coefficient de perméabilité estimé des couches sableuses faisant partie de la strate supérieure ou de la strate inférieure de sédiments de la vallée fossile est de 10^{-2} à 10^{-4} cm/sec, alors qu'il tombe à 10^{-6} à 10^{-7} cm/sec pour les couches limoneuses, les couches de sables cimentés et les couches de lignites.

L'excavation pour la construction du barrage souterrain a rencontré une nappe suspendue (eau souterraine accumulée en forme de lentille au-dessus de la nappe "principale") d'où est venue une grande quantité d'eau. La présence d'une telle nappe suspendue peut s'expliquer, comme on vient de le voir, par un écart sensible de coefficient de perméabilité entre différentes couches constituantes des sédiments de la vallée fossile.

Là où la strate supérieure (couche limoneuse) et la strate inférieure (couche sableuse) se séparent nettement, un vide d'une largeur de 0,5 à 3 cm se trouve entre les strates. La présence d'une épaisse couche de "dépôt" laissé par l'eau sur le plafond de ce vide indique que celui-ci avait constitué pendant longtemps un chenal d'eau souterraine.

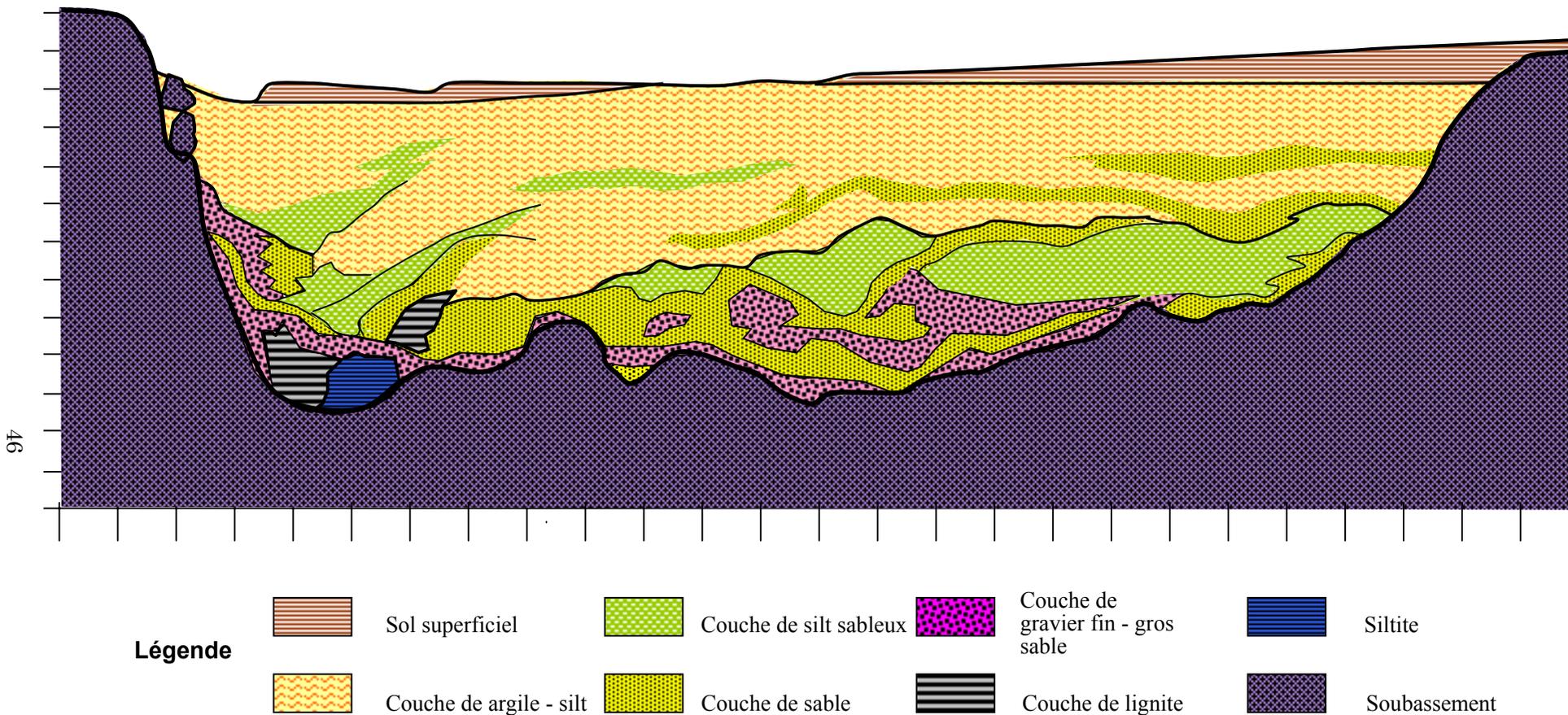


Figure 5.1: Profil géologique de la «vallée fossile» au site du barrage souterrain (profil excavé en amont)

N.B.: L'échelle verticale du profil est différente de celle horizont

6. Observation de la retenue réalisée par le barrage souterrain

A la différence du barrage en surface, le barrage souterrain ne permet pas l'observation directe de la retenue. Celle-ci est estimée à partir du niveau de la nappe phréatique, observé par les installations mises en place à cet effet.

Dans ce chapitre, nous décrivons les observations de la nappe phréatique et d'autres paramètres, effectuées dans le présent projet, ainsi que la retenue estimée à partir de leurs résultats.

6-1. Installations d'observation de la retenue (de la nappe phréatique)

Le tableau 6.1 montre les caractéristiques des installations d'observation de la retenue (de la nappe phréatique) mises en place dans le présent projet. La disposition des installations est indiquée sur la fig.6.1.

Les 5 de ces installations sont équipées de pompes à main pour l'alimentation en eau des habitants (dont 3 pompes restaient en service en mars 2003).

(1) Puits d'observation de la nappe phréatique de type crépine

Il s'agit d'un puits réalisé par un tube en plastique perforé (crépine permettant le passage de l'eau) sur toute sa longueur au-dessous du niveau d'une profondeur de 0,5 m environ et mis en place dans un forage (fig.6.2-A).

Préalablement à la construction du barrage souterrain, 5 puits de ce type ont été mis en place à l'emplacement du barrage et en son prolongement pour effectuer une observation continue de la nappe phréatique à l'aide d'un limnigraphe. Ces puits ont été enlevés lors des travaux de construction du barrage. Après l'achèvement des travaux, ont été mis en place 9 puits du même type à 200 m environ à l'amont du barrage, dont 4 en travers de la vallée et 5 à d'autres endroits. Les 5 de ces puits sont équipés d'un limnigraphe.

(2) Puits de grand diamètre

Les puits artésiens creusés dans le présent projet sont comparables au "puits de grand diamètre" (d'un diamètre intérieur de 1,8 m environ) largement répandu comme installation d'alimentation en eau au Burkina Faso. Ces puits sont munis d'un rebord en béton d'une hauteur de 2 m environ pour le protéger contre le débordement de la rivière.

A 100 m environ à l'amont et à 50 m environ à l'aval du barrage souterrain, a été respectivement mise en place un puits de grand diamètre (OW-1, -2) pour un examen visuel et comparatif de l'efficacité du barrage souterrain. Sur l'aire de la retenue de l'écluse (voir la section 7. (3)), ont été également mis en place 4 puits d'observation de grand diamètre (NP-1 à 4). Les puits de pompage mis en place pour les installations d'alimentation en eau fonctionnant à l'énergie solaire (voir la section 7. (1)) sont du même type.

(3) Puits d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche (piézomètres)

Si une "nappe suspendue" est présente au-dessus de la nappe phréatique "principale", le puits d'observation de type crépine, mentionné ci-dessus, ne permet pas d'observer correctement la nappe principale à cause des influences importantes de la nappe suspendue. La présence de

telles nappes suspendues à l'emplacement du barrage souterrain du présent projet était suggérée par l'observation effectuée au cours de l'excavation et l'observation de la nappe phréatique menée ensuite à l'aide des puits de type crépine. Afin de la vérifier et d'observer la nappe phréatique, une installation d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche (piézomètres) de la structure indiquée sur la fig. 6.2-B) a été mise en place en 4 points (PA à PD).

C'est une installation composée de 4 puits réalisés respectivement par un tube en plastique perforé seulement sur sa partie extrême et mis en place dans un forage d'une profondeur variée. Le niveau d'eau dans les tubes reflète le niveau (et la pression) de l'eau se trouvant à la profondeur à laquelle se situe la parite perforée de chaque tube.

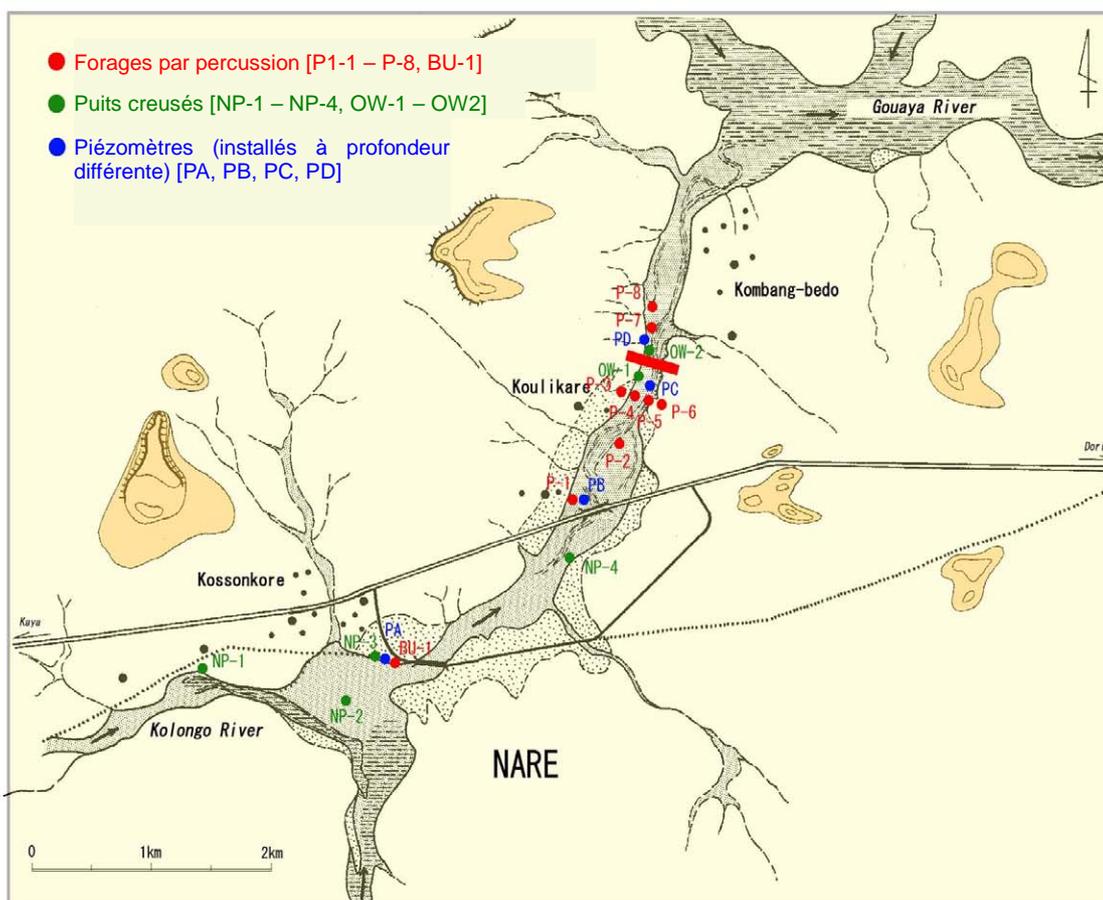


Figure 6.1: Croquis de situation des puits d'observation de la nappe phréatique

- | | |
|-------------------------|--|
| Forages par percussion: | puits d'observation de la nappe phréatique de type crépine |
| Puits creusés: | puits de grand diamètre |
| Piezomètres: | puits d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche |

Table 6.1: Caractéristiques des puits et forages d'observation de la nappe phréatique installés par le projet

Type	Numéro des puits d'observation	Profondeur du fond	Distance du barrage souterrain	Méthode d'observation	Période d'observation (années) *	Remarque	
Puits d'observation de type crépine	B-2-3	15 m	Au site du barrage souterrain	Observation continue par un limnigraphe automatique	D'octobre 1996 à novembre 1997	Enlevés lors du commencement de la construction du barrage souterrain	
	B-2-4	15 m					
	B-2-5	30 m					
	B-2-6	15 m					
	B-2-7	20 m					
	B-U-1	20 m	Environ 3,5 km en amont	Limnigraphe automatique	1997-2003	Le limnigraphe a été enlevé en 2002.	
	P-1	20 m	Environ 1,2 km en amont	Limnigraphe automatique	1998-2003	Le limnigraphe a été enlevé en 2002.	
	P-2	20 m	Environ 650 m en amont	Limnigraphe manuel	2001-2003		
	P-3	20 m	Environ 200 m en amont	Limnigraphe manuel	1997-2003		
	P-4	20 m	Environ 200 m en amont	Limnigraphe automatique	1998-2003	Le limnigraphe a été enlevé en 2002.	
	P-5	20 m	Environ 200 m en amont	Limnigraphe automatique	1998-2003	Le limnigraphe a été enlevé en 2002.	
	P-6	20 m	Environ 200 m en amont	Limnigraphe manuel	1997-2003		
P-7	60 m	Environ 200 m en aval	Limnigraphe manuel	1998-2003	Un pompe à main a été installé.		
P-8	20 m	Environ 400 m en aval	Limnigraphe automatique	1998-2003	Le limnigraphe a été enlevé en 2002.		
Puits de grand diamètre	NP-1	8 m	Environ 5 km en amont	Limnigraphe manuel	2000-2003	Un pompe à main a été installé.	
	NP-2	8 m	Environ 4 km en amont	Limnigraphe manuel	2000-2003	Un pompe à main a été installé.	
	NP-3	10 m	Environ 3,5 km en amont	Limnigraphe manuel	2000-2003	Un pompe à main a été installé.	
	NP-4	10 m	Environ 2,5 km en amont	Limnigraphe manuel	2000-2003	Un pompe à main a été installé.	
	OW-1	10 m	Environ 100 m en amont	Limnigraphe manuel	1998-2003		
	OW-2	9 m	Environ 50 m en aval	Limnigraphe manuel	1998-2003		
	KP-1	20 m	Environ 150 m en amont	Limnigraphe manuel	1998-2003	Ce sont les puits de pompage d'une installation de production d'énergie électrique et d'alimentation en eau utilisant l'énergie solaire, et la plupart des niveaux d'eau observés sont donc piézométriques.	
	KP-2	18 m	Environ 100 m en amont	Limnigraphe manuel	1998-2003		
	KP-3	20 m	Environ 50 m en amont	Limnigraphe manuel	1998-2003		
Puits d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche	PA	1	7.0 m	Environ 3,5 km en amont	Limnigraphe manuel	2000-2003	Installés près de B-U-1
		2	4.7 m				
		3	3.0 m				
		4	0.6 m				
	PB	1	5.2 m	Environ 1,2 km en amont	Limnigraphe manuel	2000-2003	Installés près de P-1
		2	3.9 m				
		3	2.5 m				
		4	1.0 m				
	PC	1	6.6 m	Environ 125 m en amont	Limnigraphe manuel	2000-2003	Installés entre KP-1 et OW-1
		2	4.5 m				
		3	3.1 m				
		4	1.5 m				
	PD	1	6.4 m	Environ 50 m en aval	Limnigraphe manuel	2000-2003	Installés près de OW-2
		2	4.8 m				
		3	3.4 m				
		4	0.9 m				

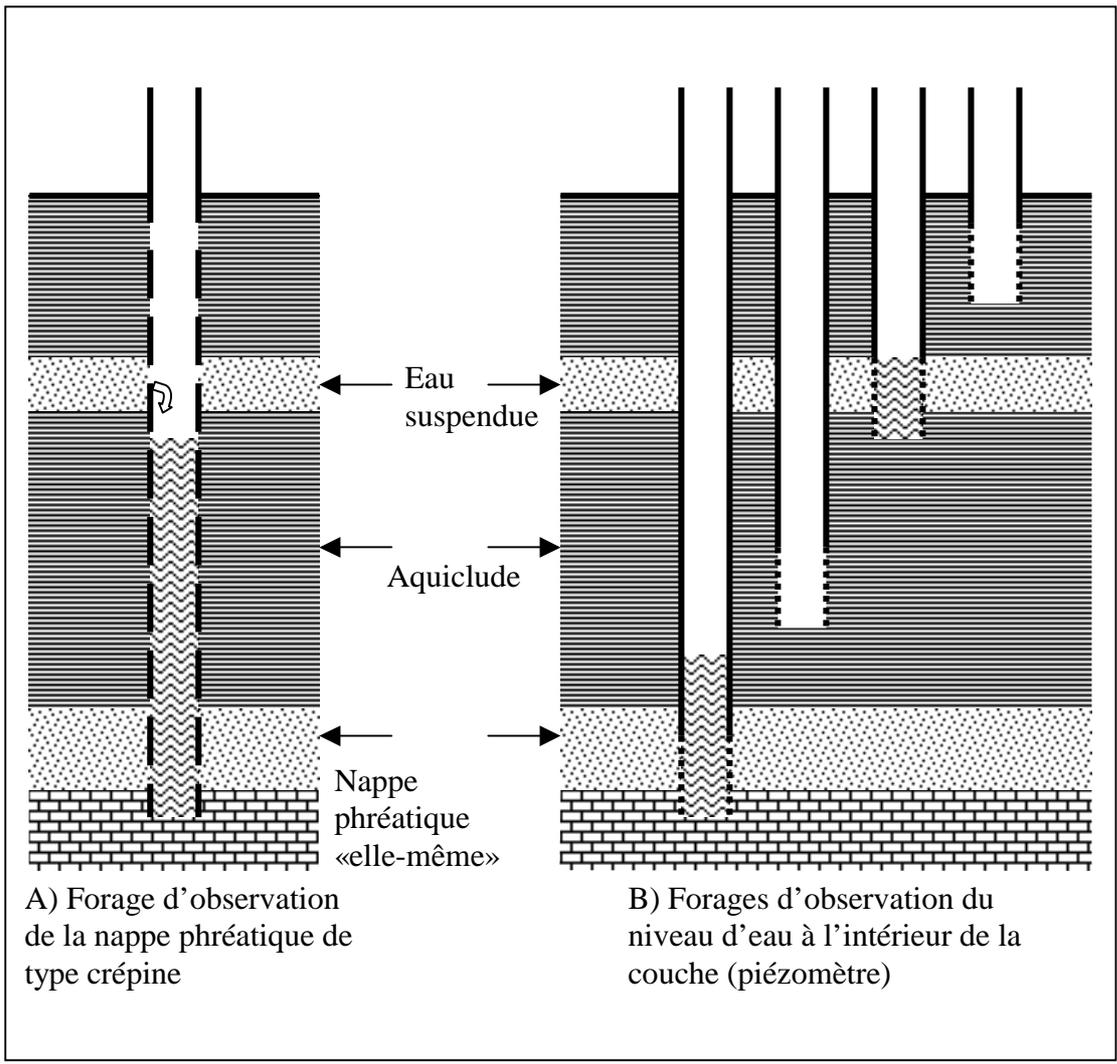


Figure 6.2: Structure de deux sortes de forages d'observation de la nappe phréatique

6-2. Résultats des observations météorologiques et du débit de la rivière

La vallée fossile où est construit le barrage souterrain est probablement enfouie le long de la rivière Kolongo. Un rapport étroit est donc suggéré entre le relèvement de la nappe phréatique retenue par le barrage souterrain et la pluviométrie du bassin de la rivière Kolongo. Par ailleurs, dans cette région semi-aride, les eaux pluviales peuvent être perdues en majeure partie par évapotranspiration.

L'évaluation quantitative de l'efficacité du barrage souterrain, il faut donc savoir non seulement le niveau de la nappe phréatique, mais aussi la pluviométrie du bassin de la rivière Kolongo, les pertes par évapotranspiration et le débit de la rivière. Or, l'observation de cette nature n'est pratiquement pas effectuée par quel organisme local que ce soit. Nous avons donc procédé à l'observation de ces paramètres dans le cadre du présent projet.

(1) Observation de la précipitation journalière

L'observation de la précipitation journalière a été commencée en 1997 au quartier de Kourkare où se situe l'emplacement du barrage souterrain, et au quartier de Kossonkore du village de Naré et plus tard en 1998 à Ouanobian et à Noka, villages situés en amont de la rivière Kolongo. Le tableau 6.2 donne les résultats de l'observation effectuée à Kourkare du village de Naré.

Table 6.2: Précipitations dans le hameau de Koulikare au village de Naré de 1997 à 2002

Année d'observation	Précipitations mensuelles (mm)									Précipitations annuelles (mm)	Récolte des céréales
	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	N-F		
1997*	0.5	19.9	31.9	73.9	123.9	81.0	102.0	35.0	0	468.1	Mauvaise
1998*	0	1.3	55.2	90.8	139.5	157.4	138.9	28.6	0	611.7	Bonne
1999	0	0.7	13.1	26.8	166.0	189.4	178.2	0	0	574.2	Moyenne
2000	0	8.3	0.9	56.1	112.6	43.5	74.8	20.7	0	316.9	Très mauvaise
2001	0	0.1	20.3	52.0	113.1	169.6	43.5	6.7	0	405.3	Moyenne
2002	0	3.0	75.6	80.2	131.0	166.1	77.8	67.8	0	601.5	Bonne

* Bien que les données de 1997 et 1998 soient celles du hameau de Kossonkore au village de Naré, elles peuvent être considérées presque comme celles du hameau de Koulikare.

* «N-F» de la dernière case des «Précipitations annuelles» dans la table ci-dessus représente les précipitations totales de novembre à février de l'année suivante.

Comme le montre le tableau 6.2, l'année 2000 était, avec une très faible précipitation annuelle de 316,9 mm, une "année de sécheresse sans précédent" d'après ce que disent les habitants. De la fin de la saison sèche de 2000 au début de la saison des pluies de 2001, le niveau de la nappe phréatique dans le réservoir créé par le barrage souterrain s'est considérablement abaissé. Cette chute extraordinaire peut s'expliquer par une sécheresse exceptionnelle de 2000.

Les précipitations annuelles du bassin de la rivière Kolongo sont données sur le tableau 6.3 qui montre qu'elles tendent à s'accroître en allant vers l'amont (dans la direction ouest-nord-ouest).

Table 6.3: Précipitations annuelles sur le bassin versant de la rivière Kolongo et ses alentours

	En mm			
	Précipitations annuelles sur le bassin versant de la rivière Kolongo (*1)			Hors du bassin versant (*2)
	Kourkare	Ouanobian	Noka	Kaya
Distance du barrage souterrain	Au site du barrage souterrain	Environ 15 km en amont	Environ 35 km en amont	Environ 50 km en amont
1998	611.7	601.2	616.8	709.6
1999	574.2	718.2	696.1	900.8
2000	316.9	-(*)3	642.1	639.4
2001	405.3	460.4	570.1	504.3
2002	601.5	488.8	791.5	-(*)4
Moyenne	501.9	567.2	663.3	688.5

*1 Observation par ce projet

*2 Observation par la Direction du Service Météorologique du Burkina Faso

*3 Cette case n'est pas remplie en raison de nombreuses données manquantes.

*4 Les données ne sont pas encore disponibles.

(2) Résultats de l'observation des évaporations

A l'emplacement du barrage souterrain, situé à Kourkare du village de Naré, l'observation des évaporations a été effectuée depuis août 2000 au moyen d'un bac d'évaporation pour déterminer l'évaporation potentielle.

Le tableau 6.4 donne les résultats de l'observation effectuée d'août 2000 à décembre 2002. Les chiffres indiqués sont des valeurs obtenues après correction des pertes dues aux vents forts.

L'évaporation potentielle annuelle s'élève à 3.700 mm avec le maximum en avril et le minimum en août.

Table 6.4: Evaporation potentielle dans le hameau de Koulikare au village de Naré

	Valeurs moyennes de août 2000 à décembre 2002												
	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuelle (*)
Evaporation mensuelle (mm)	306	327	424	476	413	310	281	183	197	259	246	255	3 703
Evaporation journalière moyenne (mm)	9.9	11.7	13.7	15.9	13.3	10.3	9.0	5.9	6.6	8.4	8.2	8.3	10.1

(3) Observation du débit de rivière

Afin d'estimer le débit de la rivière Kolongo qui alimente probablement la nappe phréatique retenue par le barrage souterrain, l'observation de la vitesse et du niveau de cours d'eau a été effectuée en endroits où la géométrie de la section du cours d'eau pouvait être déterminée sans difficulté. Les 2 points d'observation ainsi fixés étaient aux croisements de la rivière Kolongo avec l'ancienne route principale d'une part et avec l'actuelle route principale d'autre part.

L'observation a été menée pendant 5 ans de 1998 à 2002, mais des résultats fiables n'ont pas été obtenus qu'en 2000 et en 2001. Le débit de la rivière, déterminé à partir des résultats de l'observation en point situé à son croisement avec l'ancienne route principale est suivant :

- en 2000 (année exceptionnelle sèche) : 6.000.000 m³/an environ
- en 2001 : 11.000.000 m³/an environ

6-3. Variation du niveau de la nappe phréatique dans le réservoir

(1) Vérification de l'efficacité du barrage souterrain

La fig. 6.3 montre le niveau de la retenue déterminé à deux périodes après l'achèvement du barrage, soit le 2 octobre 1998 (au début de la saison sèche) et du 19 au 24 février 1999 (au milieu de la saison sèche).

Dans les deux périodes, le niveau de la retenue était supérieur de 4,5 à 6,6 m par rapport au niveau de la nappe phréatique à l'aval du barrage. Il était également supérieur de 2,5 à 5 m environ par rapport aux périodes correspondantes antérieures à la construction du barrage. Tous ces résultats prouvent l'efficacité du barrage souterrain.

(2) "Variation saisonnière" du niveau de la retenue

Cependant, le niveau de la retenue s'abaisse en saison sèche comme le montrent les résultats de l'examen comparatif des deux périodes, donnés sur la fig. 6.3. Certes, le pompage de l'eau retenue est pratiqué, mais la quantité d'eau ainsi prélevée est minime par rapport au volume de la retenue (quantité annuelle d'environ 3.000 m³t (voir la section 7.(1)) contre le volume estimé de la retenue de l'ordre de 400.000 m³ à la fin de la saison sèche de 2002 (voir la section 6-5)) et ne peut donc pas causer une baisse appréciable du niveau de la retenue.

La "variation saisonnière" du niveau de la retenue d'une telle ampleur revient chaque année. La preuve en est la fig. 6.4 qui montre les résultats de l'observation continue de la nappe phréatique effectuée de juin 1998 à février 2003 dans le puits P-4 (puits de type crépine) situé à 200 m environ à l'amont du barrage souterrain. Le tableau donne également le niveau de la nappe phréatique, observée de novembre 1996 à novembre 1997 dans le puits B-2-4 situé à l'emplacement du barrage, pour la comparaison avec la situation avant la construction du barrage.

(3) Variation interannuelle du niveau de la retenue

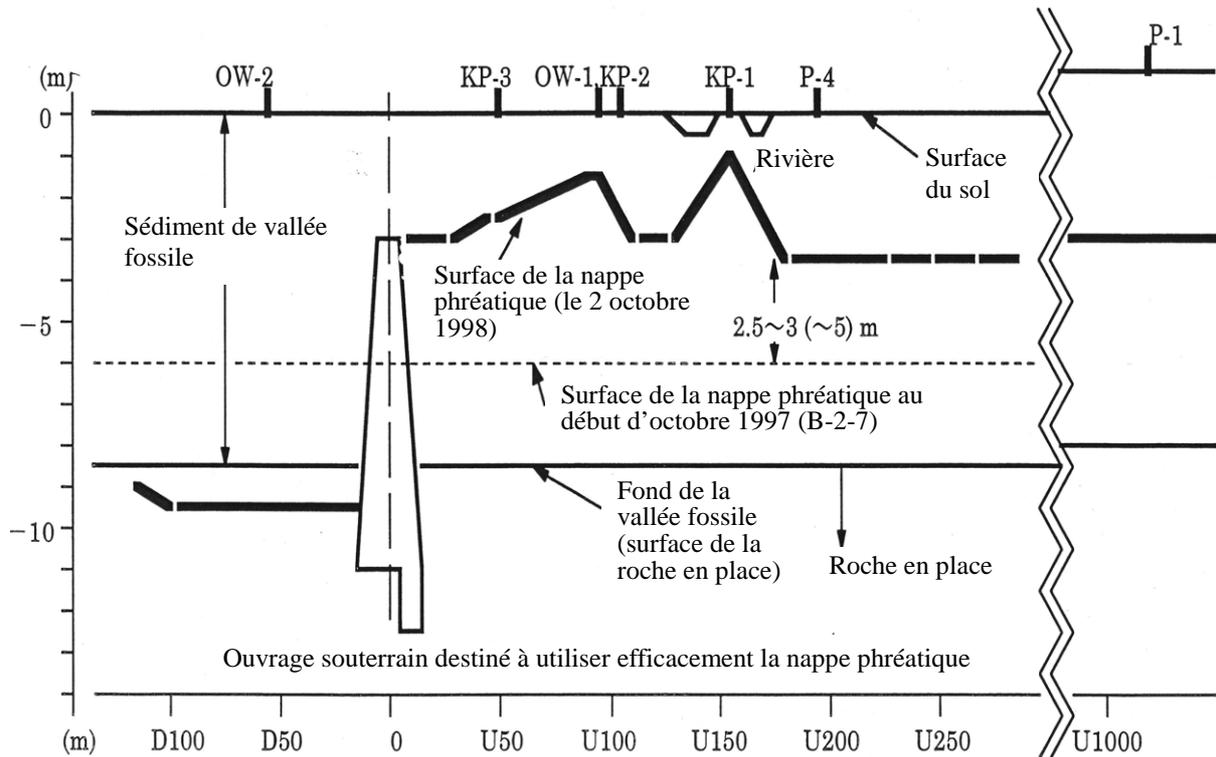
Des résultats de l'observation du niveau de la retenue donnés sur la fig. 6.4, est ressorti ce qui caractérise la variation interannuelle du niveau de la retenue :

- 1) Le niveau de la retenue s'élève chaque année en saison des pluies et marque une baisse de 2,5 à 4,5 m de mai à juin, soit pendant la période de la fin de la saison sèche au début de la saison des pluies.
- 2) Le "niveau minimal" enregistré toujours pendant la période de la fin de la saison sèche

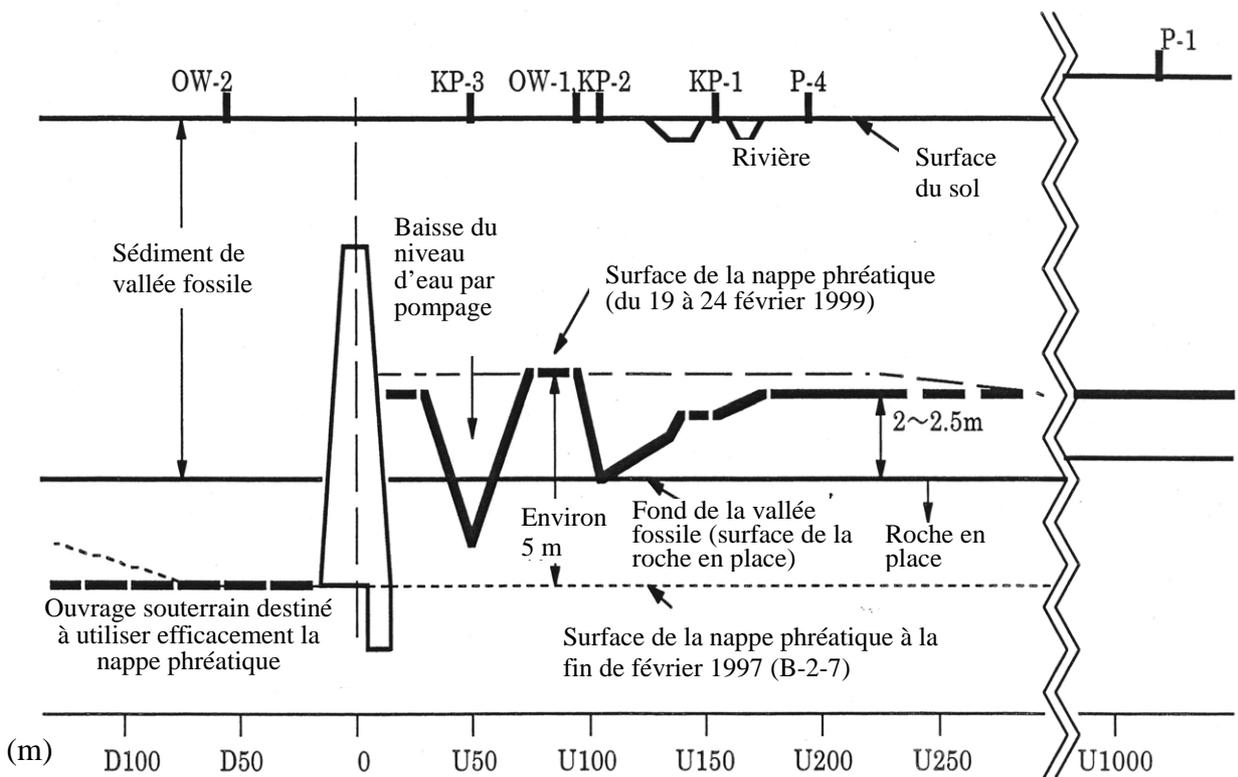
- au début de la saison des pluies augmente d'une année en année, sauf en 2001.
- 3) Le niveau de la retenue marqué pendant la saison des pluies de 2000 était considérablement bas par rapport aux années précédentes et le "niveau minimal" enregistré pendant la période de la fin de la saison sèche au début de la saison des pluies a connu une baisse en 2001. Celle-ci peut être attribuée aux influences de la sécheresse exceptionnelle de 2000 qui avait affecté le village de Naré et ses environs. La retenue était également à un niveau bas pendant la saison des pluies de 2001, mais cela peut s'expliquer par le fait que la précipitation annuelle du bassin de la rivière Kolongo était faible en 2001 par rapport à l'année précédente (voir le tableau 6.3). Le niveau de la retenue est ainsi étroitement lié à la pluviométrie du bassin versant du cours d'eau.

Somme toute, on peut dire que le niveau de la retenue s'élève d'année en année, malgré une importante variation saisonnière et une baisse qui se produit pendant l'année sèche exceptionnelle.

Comme le montre la fig. 6.5, la variation interannuelle du niveau de la nappe phréatique, observé dans le puits NP-1 situé à 5 km à l'amont du barrage souterrain, suit une évolution analogue, la nappe tendant à monter en renouvelant une "variation saisonnière". Cette tendance à la hausse est également observée dans les autres puits situés à l'amont du barrage. On peut donc conclure que le niveau de la retenue va en s'élevant avec, par conséquent, un élargissement vers l'amont de la retenue. Celle-ci s'étendait, selon une estimation, jusqu'à 5 à 6 km ou plus en amont du barrage souterrain en 2002.



A: Le niveau de la nappe phréatique en amont et aval de l'ouvrage souterrrain destiné à utiliser efficacement la nappe phréatique (le 2 octobre 1998)



B: Le niveau de la nappe phréatique en amont et aval de l'ouvrage souterrrain destiné à utiliser efficacement la nappe phréatique (du 19 à 24 février 1999)

Figure 6.3: Evolution de la situation du remplissage du barrage souterrrain

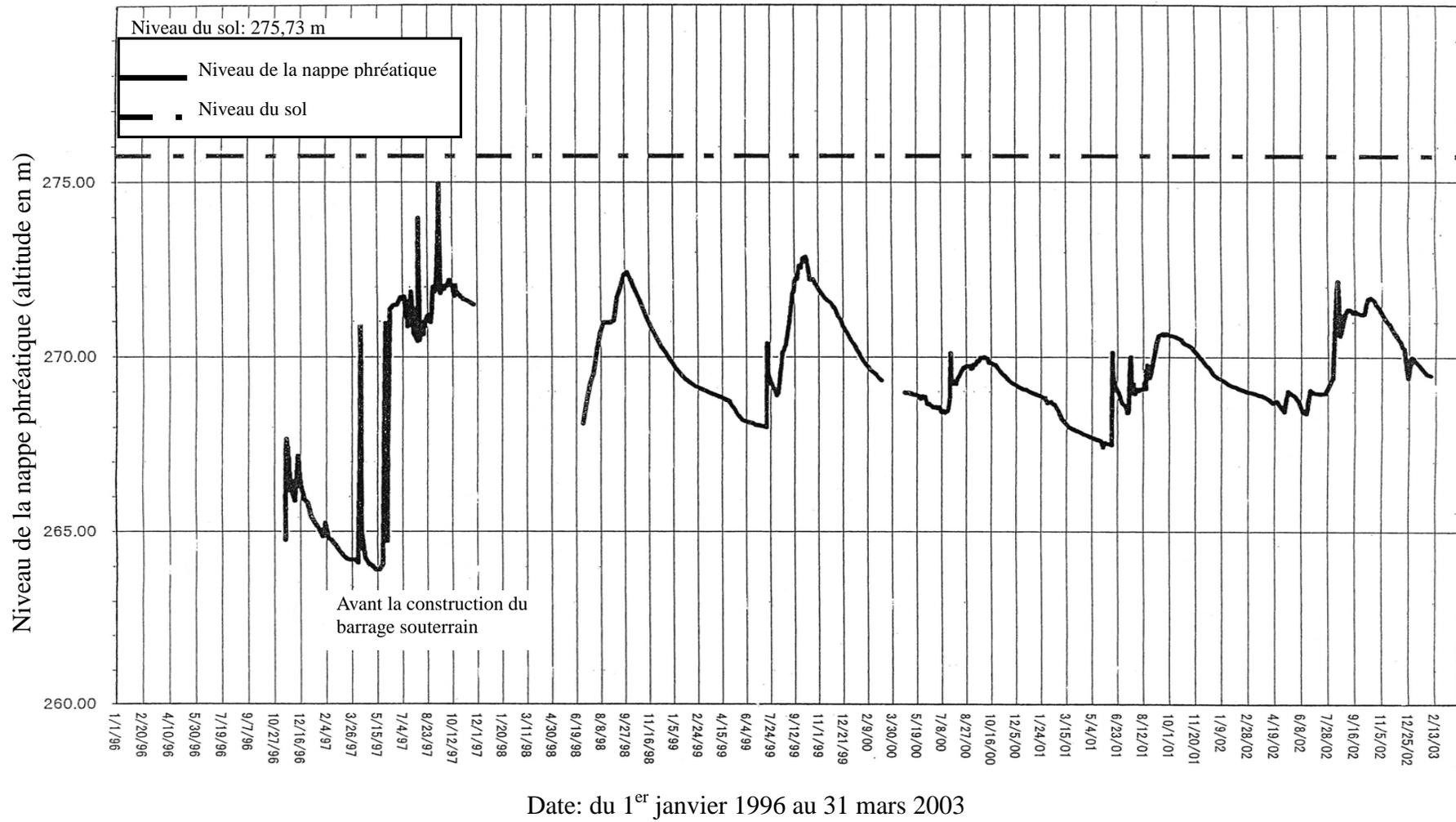
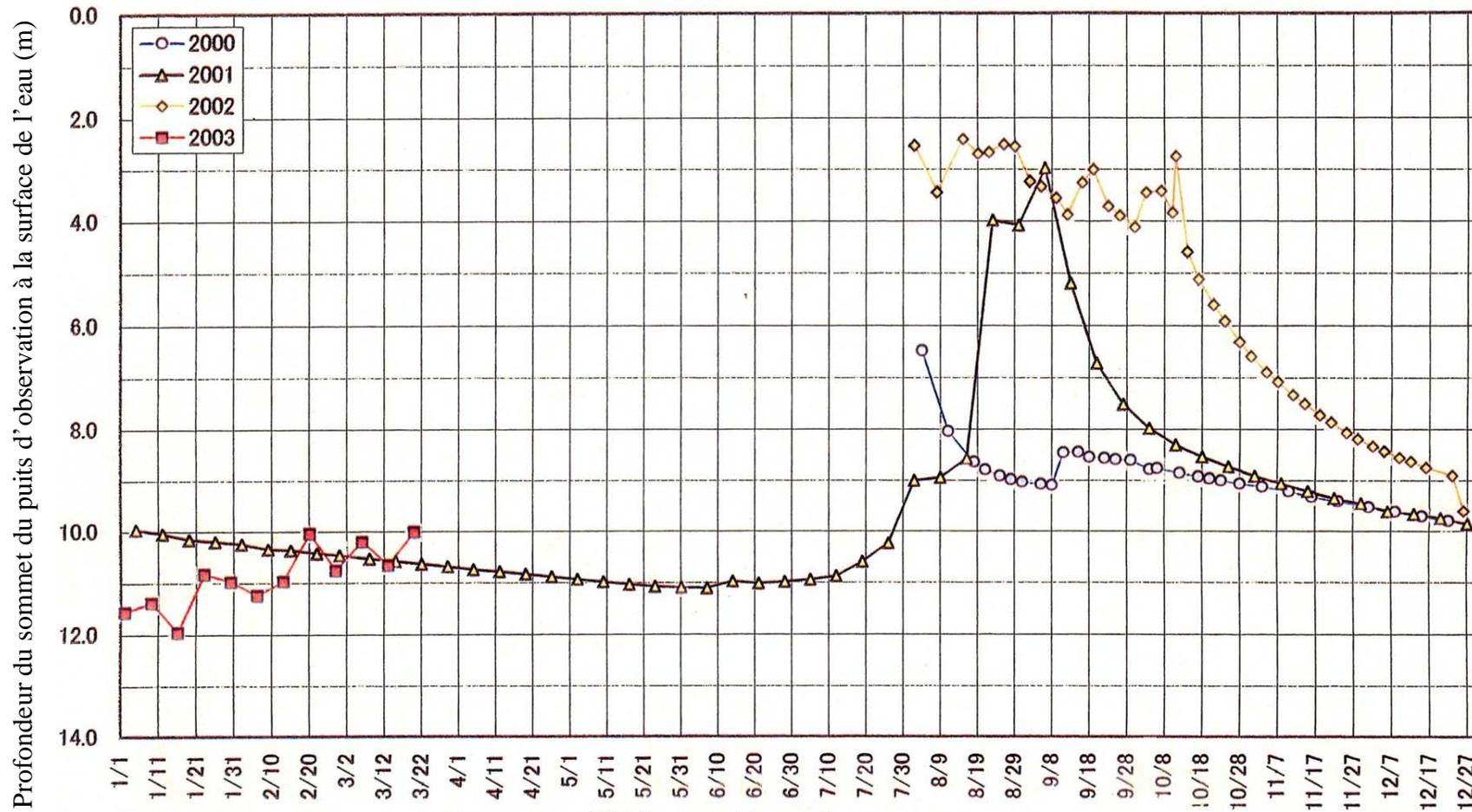


Figure 6.4: Résultats de l'observation continue de la cote du plan d'eau du barrage souterrain (forage d'observation P-4)



Les résultats montre qu'en général le niveau de la nappe phréatique monte annuellement avec la «variation saisonnière» remarquable.

Figure 6.5: Variation annuelle du niveau de la nappe phréatique dans le puits d'observation NP-1

6-4. Analyse de la "variation saisonnière" du niveau de la retenue

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, le niveau de la retenue créée par le barrage souterrain grimpe pendant la saison des pluies, mais loin d'être maintenu, s'abaisse considérablement une fois que la saison sèche commence.

Cette chute du niveau de la retenue peut être attribuée aux "fuites" dans le réservoir. Cependant, comme le montre la fig. 6.3, un écart appréciable du niveau de la nappe phréatique entre les zones à l'amont et à l'aval du barrage prouve que l'étanchéité du corps du barrage n'est pas tellement douteuse. Il peut donc y avoir des fuites vers le substratum.

D'autre part, les "nappes suspendues" dont la présence dans les "sédiments de la vallée fossile" a été constatée lors des travaux d'excavation, exercent des influences sur le niveau d'eau observé dans les puits de type crépine. Ce niveau ne représente donc pas précisément le niveau de la nappe phréatique "principale".

Afin de déterminer les comportements de ces nappes suspendues, une "installation d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche" (piézomètre) ayant la structure indiqué sur la fig 6.1-B) a été mise en place en 4 points (dont 3 dans le réservoir (PA, PB, PC) et 1 à 50 m environ à l'aval du barrage (PD)).

Les résultats de l'observation confirme la présence d'au moins deux nappes suspendues étagées dans la strate supérieure de sédiments de la vallée fossile qui font partie de la couche-réservoir. La présence de tels "aquifères perchés" étagés a été constatée dans tous les trois puits d'observation situés dans le réservoir (PA, PB, PC) et considérée donc comme un caractère commun à l'ensemble des sédiments de la vallée fossile se trouvant dans cette région. L'eau n'est présente dans aucun des deux aquifères perchés étagés pendant la période de la fin de la saison sèche au début de la saison des pluies. C'est à l'époque où la rivière Kolongo recommence à s'écouler et les champs inondable recouverts d'eau que les nappes suspendues réapparaissent. Avec la disparition de l'eau de rivière, les nappes suspendues s'abaissent pour disparaître presque totalement au milieu de la saison sèche.

Quant à la nappe phréatique "principale", son niveau (représenté par le plus bas des niveaux d'eau observés dans les puits d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche) commence à remonter avec un certain retard par rapport à la réapparition des nappes sususpendues et à une vitesse plus faible que celles-ci. Et le niveau maximal de l'année de la nappe phréatique est toujours plus bas que celui observé dans les puits de type crépine pendant la même période.

Il en ressort que la variation saisonnière du niveau d'eau observé dans les "puits de type crépine" est surestimée par rapport à celle de la nappe phréatique "principale" à cause de la présence de nappes suspendues.

Pour évaluer l'efficacité du barrage souterrain à partir des résultats obtenus dans les puits d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche (piézomètres) et les puits de type crépine, il est donc important de prendre en considération ce qui suit :

- 1) Quand les nappes sususpendues sont présentes, la montée du niveau d'eau observé pendant la saison des pluies dans les puits de type crépine ne représente pas toujours celle du niveau de la retenue.

- 2) Pendant la seconde moitié de la saison sèche où les nappes suspendues disparaissent, le niveau d'eau observé dans les puits de type crépine peut être considéré comme celui de la retenue (niveau de la nappe phréatique).
- 3) Le niveau de la nappe phréatique correspond au plus bas des niveaux observés dans les puits d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche.
- 4) La variation du niveau d'eau observé dans les puits de type crépine est probablement surestimée par rapport à celle de la nappe phréatique.

Cependant, le plus bas des niveaux observés dans les puits d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche, de même que le niveau d'eau observé dans les puits de type crépine, s'abaisse en saison sèche. Il est donc certain qu'il y a des fuites dans le substratum qui constitue le fond du réservoir. Leur quantité correspond approximativement à la baisse du plus bas niveau observé dans les puits d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche.

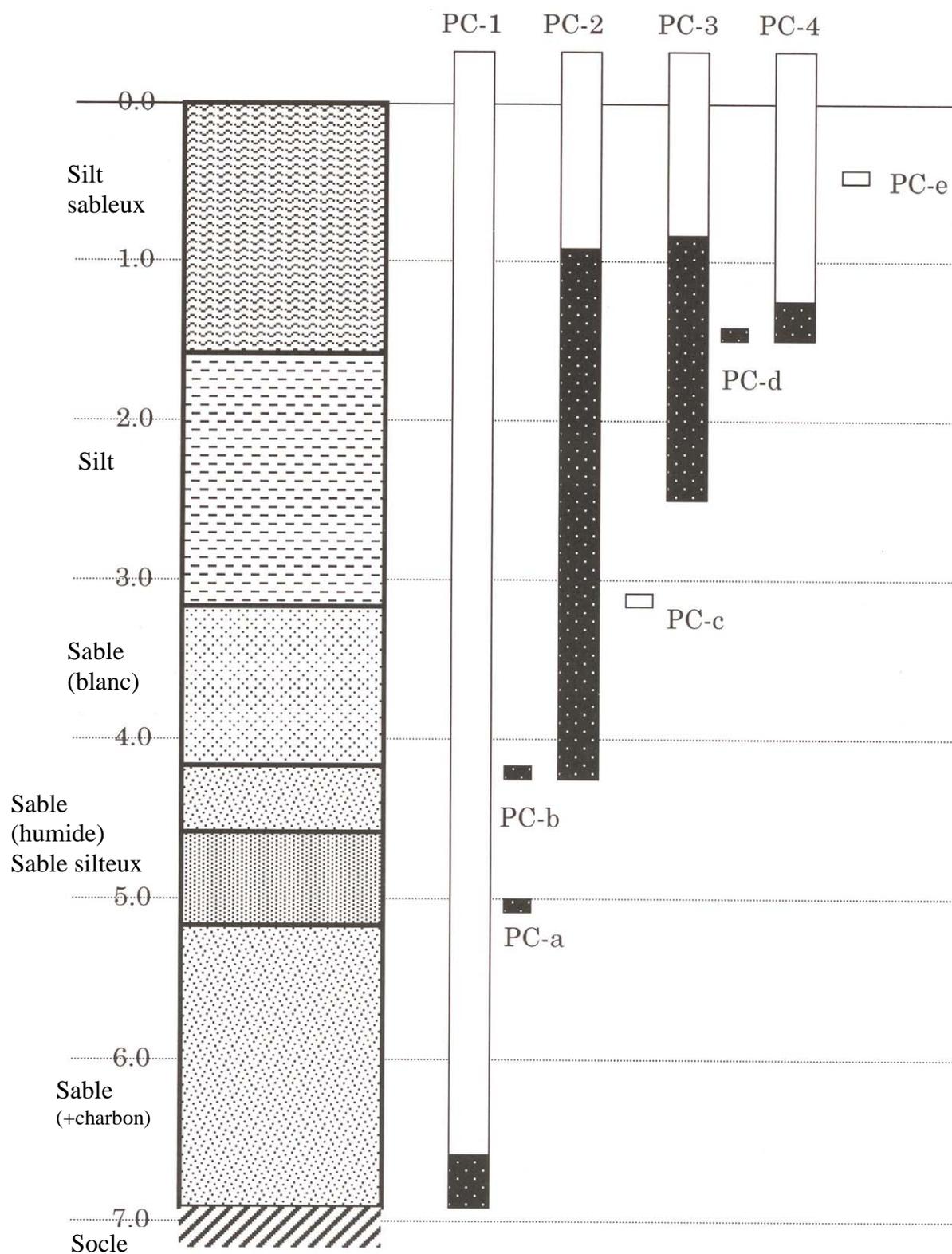


Figure 6.6: Résultats de l'observation d'après «le forages d'observation du niveau d'eau à l'intérieur de la couche» (puits d'observation PC) (le 20 juillet 2000)

6-5. Evaluation de la retenue réalisée par le barrage souterrain

A partir des résultats des études et des observations décrits ci-dessus, une analyse du mécanisme de la retenue réalisé par le barrage souterrain a été effectué suivant l'organigramme donné sur la fig. 6.7.

Seuls les résultats de l'analyse sont présentés ci-après sans entrer dans les détails du procédé.

Compte tenu de la disponibilité des données, nous avons utilisé une méthode d'analyse très simplifiée qui laisse donc beaucoup à désirer.

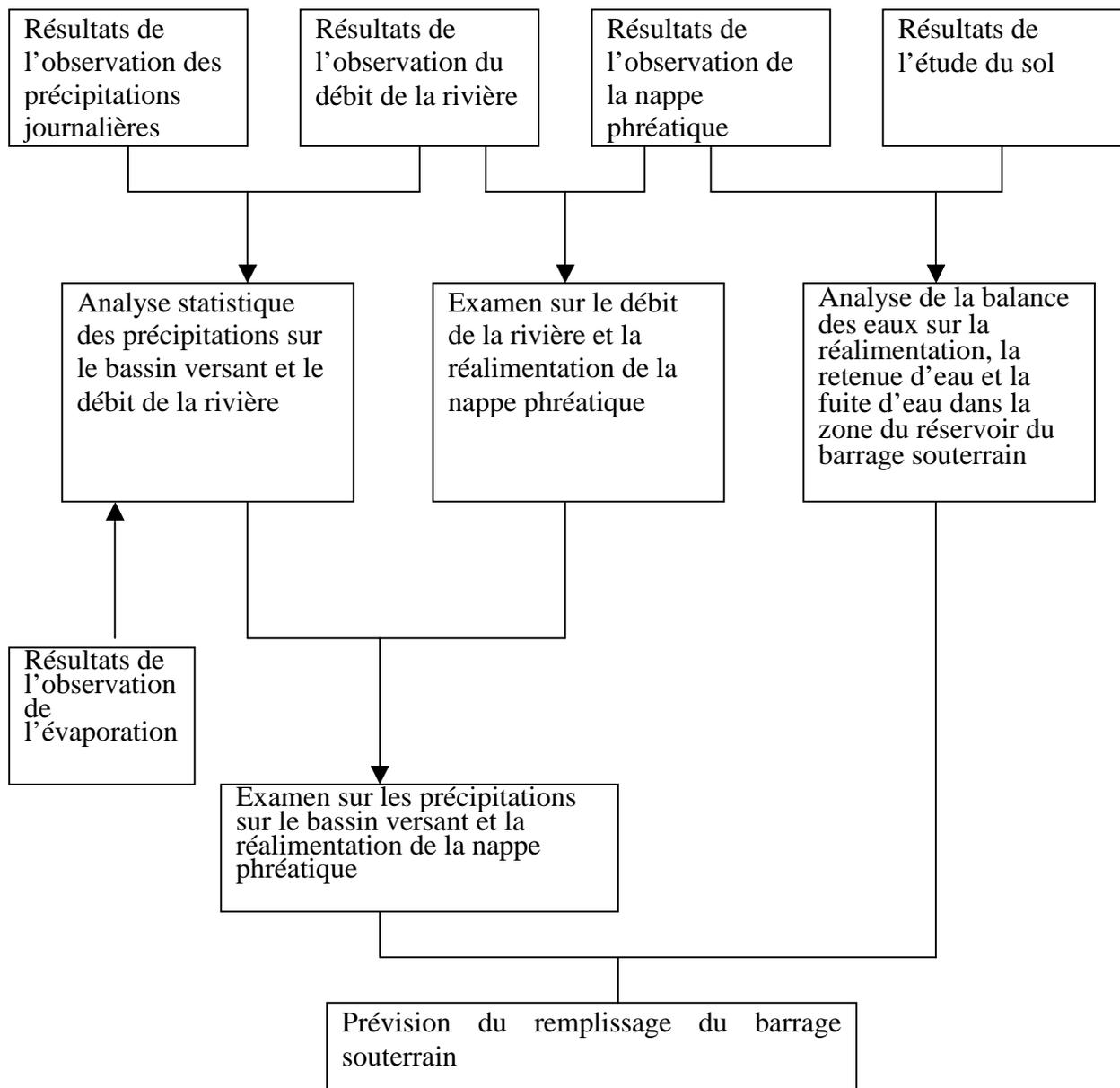


Figure 6.7: Organigramme de l'analyse du mécanisme du remplissage

(1) Relation entre la pluviométrie du bassin versant et le débit du cours d'eau

L'analyse statistique du débit journalier, mesuré au croisement de la rivière Kolongo et de l'ancienne route principale qui traverse le village de Naré, ainsi que de la précipitation journalière du bassin de la rivière Kolongo donne des relations indiquées sur la fig. 6.8.

(* Les précipitations du bassin versant sont estimées sur la base des relevés pluviométriques de Naré/Kolikare, Ouanobian, Noka et Kaya.)

(2) Relation entre la réalimentation de la nappe phréatique et le débit du cours d'eau

A partir du débit du cours d'eau mesuré en 2000 et en 2001 ainsi que de l'estimation de la réalimentation de la nappe phréatique, une relation suivante est établie :

Réalimentation de la nappe phréatique

= 10 à 15% environ du débit du cours d'eau de juillet à octobre (*)

(* le débit du tronçon se trouvant dans le village de Naré)

(3) Relation entre la pluviométrie du bassin versant et la réalimentation de la nappe phréatique

Les relations données ci-dessus à (1) et (2) permettent d'estimer la réalimentation de la nappe phréatique à partir de la pluviométrie du bassin de la rivière Kolongo

(4) Dimensions de la retenue réalisée par le barrage souterrain

D'après le nivellement de l'axe d'un profil longitudinal effectué sur le réservoir, la pente de la surface du sol est de 0,65/1000 environ. Le forage des puits d'observation dans le réservoir a mis par ailleurs en évidence que l'épaisseur des sédiments de la vallée fossile se trouvant dans le réservoir (couche-réservoir) est comparable à celle des sédiments de la vallée fossile se trouvant à l'emplacement du barrage. A supposer donc que la pente du fond du réservoir soit égale à celle de la surface, les dimensions de la retenue sont les suivantes :

- Largeur de la retenue : environ 150 m en moyenne (la plus basse estimation)
- Etendue maximale de la retenue : s'étendant jusqu'à 13,4 km environ en amont du barrage
- Niveau maximal de la retenue : -3 m
- Volume de la couche-réservoir : 9.000.000 m³ environ
- Capacité maximale de stockage : 1.800.000 m³ (une porosité efficace supposée de la couche-réservoir d'environ 20%)

(5) Résultats de l'analyse du bilan d'eau dans le réservoir

A partir des résultats de l'analyse du bilan d'eau, effectuée pour le réservoir en tenant compte de la réalimentation, de la retenue et des fuites, l'évolution de la retenue après la mise en place du barrage souterrain a été estimée comme ce qui est donné sur le tableau 6.5.

Table 6.5: Evolution de la situation du remplissage du barrage souterrain

En m³

	(1) Réalimentation de la nappe phréatique	(2) Fuite d'eau	Augmentation de la quantité d'eau retenue (1)-(2)	Quantité totale d'eau retenue à la fin de la période de sécheresse
De la période de pluie en 1998	1,200,000		(1,200,000)	(1,200,000)
A la fin de la période de sécheresse en 1999		990,000	210,000	210,000
De la période de pluie en 1999	1,200,000		(1,200,000)	(1,410,000)
A la fin de la période de sécheresse en 2000		990,000	210,000	420,000
De la période de pluie en 2000	750,000		(750,000)	(1,170,000)
A la fin de la période de sécheresse en 2001		990,000	-240,000	180,000
De la période de pluie en 2001	1,200,000		(1,200,000)	(1,380,000)
A la fin de la période de sécheresse en 2002		990,000	210,000	390,000
Total	4,350,000	3,960,000	390,000	390,000

N.B.: Le remplissage du barrage souterrain a été réellement commencé à la période de pluie en 1998.

(6) Prévision de la retenue

Comme le montre le tableau 6.5, les pertes dûes fuites sont estimées à 990.000 m³ l'an. Avec une sécheresse exceptionnelle, comme celle de 2000, la retenue peut se trouver, à la fin de la saison sèches l'année suivante, diminuée par rapport à l'année précédente.

Mais compte tenu de la rareté de la sécheresse d'une telle ampleur, si on suppose que la réalimentation moyenne annuelle corresponde à 90% environ de celle observée en 2001 (environ 1.200.000 m³), soit 1.100.000 m³, la retenue évoluera de la façon suivante :

- 1) Avec la réalimentation de la nappe (augmentation de la retenue) pendant la saison des pluies, le réservoir sera "plein" pendant la saison des pluies de 2005. La retenue sera alors de 1.800.000 m³ environ.
- 2) Mais à cause des fuites, la retenue diminue à 800.000 m³ environ à la fin de la saison sèches (jusqu'au début de la saison des pluies) de 2006.
- 3) Avec une réalimentation estimée à 1.100.000 m³ pendant la saison des pluies de 2006, la retenue atteindra la capacité maximale de 1.800.000 m³ environ et 100.000 m³ environ d'eau en excès sera déversée par la crête du barrage.
- 4) Au-delà, ce cycle se r ep etera. C'est-à-dire, la retenue sera de 1.800.000 m³ environ (volume maximal) en saison des pluies et diminuera à 800.000 m³ environ à la fin de la saison sèches de l'année suivante.

Dans cette évaluation qui s'appuyait sur la modélisation de la "couche-réservoir" constituée des sédiments de la vallée fossile ainsi que de la couche d'altération forte du substratum, couche sous-jacente des sédiments, seule comptait l'eau retenue dans cette couche-réservoir et toute eau qui en sort était consid eree comme "pertes par fuites". Or, les "fuites" vers le substratum sont, d'un autre point de vue, des apports d'eau au substratum. D'après l'analyse du bilan d'eau décrite ci-dessus, les "pertes" accumulées depuis la mise en place du barrage souterrain jusqu'à la fin de la saison sèches de 2002 s'élèvent à 4.000.000 m³ environ. Autrement dit, autant d'eau a été introduite dans le substratum. Il est impensable, certes, que la totalité de cette eau reste dans le substratum au voisinage du barrage, mais une partie appréciable peut s'y trouver "retenue".

Relation entre les précipitations sur le bassin versant X (m³/jour)
et le débit de la rivière journalier Y (m³/jour) au village de Naré

De mai à juin: $Y = 0.022X + 29,000$ Coefficient de corrélation = 0.615

De juillet à octobre: $Y = 0.057X + 38,000$ Coefficient de corrélation = 0.656

Cependant, pour calculer les précipitations sur le bassin versant X (les précipitations x le bassin versant), il faut utiliser les valeurs de correction des précipitations suivantes.

Où: E représente l'évaporation potentielle journalière moyenne du mois correspondant (mm)

Bassin versant A1 et A2: $\{(Précipitations\ d'il\ y\ a\ 3\ jours - 3.4\ E) + (Précipitations\ d'il\ y\ a\ 2\ jours - 3.4\ E)\} / 2$

Bassin versant A3: $\{(Précipitations\ d'il\ y\ a\ 2\ jours - 1.0\ E) + (Précipitations\ d'il\ y\ a\ 1\ jour - 1.0\ E)\} / 2$

Bassin versant A4: $\{(Précipitations\ d'il\ y\ a\ 2\ jours - 0.6\ E) + (Précipitations\ d'il\ y\ a\ 1\ jour - 0.6\ E)\} / 2$

Bassin versant A5: Précipitations du jour - 0.6 E

* En cas de (Précipitations journalières - E) ≤ 0, cela est considéré comme égal à zéro.

La division approximative du bassin versant est la suivante:

Barrage souterrain

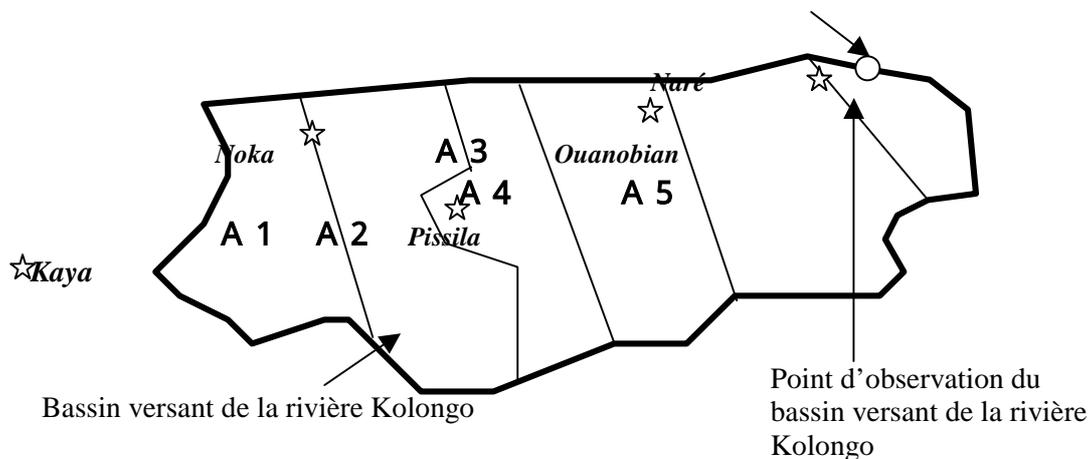


Figure 6.8: Relation entre le débit journalier de la rivière et les précipitations sur le bassin versant au point d'observation de la rivière Kolongo au village de Naré

7. Autres études

Outre les investigations et les observations pour la construction du barrage souterrain et l'évaluation de son efficacité, décrites ci-dessus, les études suivantes ont été menées dans le cadre du présent projet.

(1) Installations expérimentales d'alimentation en eau fonctionnant à l'énergie solaire

Dans le but d'étudier des méthodes d'utilisation rationnelle de l'eau retenue par le barrage souterrain, ont été mises en place les installations expérimentales d'alimentation en eau fonctionnant à l'énergie solaire (voir aussi les photos à la fin du présent chapitre) :

- Puits de pompage : 3 puits artésiens disposés dans le réservoir (d'une profondeur de 20 m environ)
- Unités photovoltaïques : 3 panneaux solaires d'une puissance de 1,76 kwp
- Installations d'alimentation en eau : châteaux d'eau, installations de distribution d'eau (points d'eau collectifs), abreuvoirs, installations d'irrigation pour essais agricoles

L'eau tirée des 3 puits de pompage à l'aide de moteurs submersibles alimentés par énergie solaire est déplacée dans les châteaux d'eau d'où elle est amenée aux installations de distribution d'eau disposées dans le village de Kombangbedo.

La quantité d'eau ainsi fournie qui était de plus de 30 m³/j dans les premiers temps a passé en 2002 à 2.700 m³ environ, soit 7,4 m³/j environ en moyenne, à la suite de la mise en place de pompes à main et la restriction volontaire de l'utilisation pour l'abreuvement,.

(2) Essais agricoles

Afin d'étudier des méthodes d'utilisation rationnelle de l'eau souterraine en agriculture, des essais agricoles ont été effectués sur des champs d'expérience spécialement aménagés, avec l'eau fournie par les installations d'alimentation en eau fonctionnant à l'énergie solaire mentionnées ci-dessus : la culture de céréales (mil, sorgho) et de légumes (tomate, oignon) en application de l'irrigation à perfusion, de l'irrigation par pression négative et de l'irrigation manuelle avec différentes quantités d'eau.

Les résultats des essais montrent que l'irrigation avec un apport d'eau bien contrôlé permet d'assurer une certaine récolte même "l'année de sécheresse exceptionnelle". Toutefois, pour que l'eau retenue par le barrage souterrain puisse favoriser l'agriculture dans des conditions opérationnelles, il faut mettre au point des techniques permettant d'irriguer de façon efficace et économique des terres cultivées d'une grande étendue.

(3) Mise en place d'une écluse

Dans le but de faciliter la réalimentation de la nappe phréatique et de favoriser le développement agricole et la pêche en eau douce, un "écluse (micro barrage à vanes)" a été mise en place sur la rivière Kolongo à 1,5 km environ à l'amont du barrage souterrain (voir la photo à la fin du présent chapitre).

Cette écluse d'une longueur totale de 33 m environ est constituée par le remblai existant de la route principale, dans lequel sont disposées 23 vanes. Le niveau maximal de la retenue ainsi créée est de 1,2 m.

L'ouverture des vanes est réglée par les habitants qui pratiquent la riziculture sur les champs

inondables. Depuis la mise en place de l'ouvrage, la surface rizicole augmente largement et la pêche apportée par le plan d'eau paraît également en accroissement.

(4) Etudes de végétation visant à évaluer les incidences sur l'environnement

Afin d'évaluer les incidences sur l'environnement du changement des réserves en eau souterraine éventuellement provoqué par le barrage souterrain, ont été effectuées les études de végétation suivantes, centrées notamment sur les arbres:

- 1) Un suivi du changement éventuellement survenu dans la végétation des alentours du réservoir a été: effectué de 1998 à 1999 sur une zone d'environ 15 km² englobant le réservoir et son voisinage. Les essences ainsi que la hauteur et le diamètre des arbres ont été observés en 29 points disposés à environ 500 m d'intervalle. Nous avons repris l'observation aux mêmes points de 2001 à 2002.
- 2) Une étude sur la croissance des arbres à l'amont et à l'aval du barrage souterrain a été: effectuée de novembre 2000 à décembre 2002 sur les zones d'études situées de 50 à 100 m à l'amont et à l'aval du barrage en vue d'une comparaison de la croissance des arbres dans ces zones.

Les essences faisant l'objet de l'étude étaient l'*Acacia seyal*, le *Mitragyna inermis* et le *Piliostigma reticulatum*. Dans cette étude, ont été principalement examinés, une ou deux fois par mois, la vigueur d'arbre, la forme d'arbre, l'état du feuillage (bourgeonnement, couleur de feuille, quantité des feuilles, la défeuillaison), l'état des fleurs (la fleuraison, la quantité des fleurs) et l'état des fruits (la fructification, la quantité des fruits).

A ces études se sont ajoutés l'examen de l'inventaire des espèces établis avant la formation de la retenue ainsi que les essais visant à étudier des méthodes d'évaluation quantitative des incidences sur l'environnement.

Le suivi mentionné ci-dessus à 1) n'a constaté aucun changement dans la végétation du réservoir et de son voisinage, à part ceux qui sont tout à fait imputables à d'autres activités humaines. Par contre, d'après l'étude décrite ci-dessus à 2), la défeuillaison tend nettement à être précoce à l'aval par rapport à l'amont du barrage, ce qui suggère une différence d'humidité du sol entre ces deux zones. Toutefois, des arbres morts n'ont été signalés ni à l'amont ni à l'aval.

La différence d'état de la végétation entre les zones à l'amont et à l'aval du barrage est donc un seul "changement dans l'environnement" constaté pendant les années qui se sont écoulées depuis la mise en place du barrage jusqu'à la fin de 2002. Elle peut par ailleurs être attribuée à une différence de distribution d'eau de surface et ne signifie donc pas nécessairement des effets du barrage souterrain.

(5) Enquête menée auprès des habitants sur le présent projet

De janvier à février 2002, une enquête sur le présent projet a été menée sous forme d'interview auprès des habitants du village de Naré, site d'accueil, et des hameaux voisins.

Ses résultats montrent que les habitants sont en général favorables.

Il est intéressant de noter que pendant la durée du présent projet et indépendamment du celui-ci, ont été réalisés les aménagements suivants dont certains avec une participation de quelques-uns de ceux qui travaillaient pour le présent projet :

- 3 moulins; par "Fonds pour aide de petites sommes" du Japon
- 4 pompes à main; par une aide financière de JICA (Japan International Cooperation Agency)
- 1 potager équipé de 4 puits de grand diamètre pour les exploitantes de Naré; par le gouvernement du Burkina Faso
- 4 vergers; par une ONG japonaise (GEO-Action)



Photo 7.1: Installation de production d'énergie électrique utilisant l'énergie solaire pour le pompage



Photo 7.2: Puits de pompage installé dans la zone du réservoir du barrage souterrain (Des murs de béton sont coulés autour du puits pour le protéger contre les crues)



Photo 7.3: Installation d'alimentation en eau domestique construite au village de Kombang-bedo



Photo 7.4: Champ de démonstration aménagé selon le projet
(L'eau retenue par le barrage souterrain pompée dans l'installation de production d'énergie électrique utilisant l'énergie solaire est utilisée pour l'irrigation)



Photo 7.5: “Ecluse (micro barrage à vannes)” installée par le projet

8. Recommandations pour les projets futurs de barrage souterrain

Les résultats des études menées, dans le cadre du programme portant sur le projet expérimental de lutte contre la désertification, sur l'aménagement expérimental avec la mise en place d'un barrage souterrain montrent que cette "technique de barrage souterrain" mise au point au Japon est applicable en Afrique occidentale, région affectée par la désertification.

Cependant, pour réaliser un barrage souterrain opérationnel et bien adapté aux conditions physiques et sociales de la région d'accueil, il faut porter une grande attention à ce qui suit.

8-1. Choix de l'emplacement d'un barrage souterrain

(1) Evaluation d'une "vallée fossile"

Dans le présent projet, le barrage souterrain a été construit en mettant en oeuvre la présence d'une vallée fossile. La possibilité de mettre en place un barrage à un pareil emplacement a été ainsi confirmée, malgré le problème des fuites qui s'est posé.

Dans le bassin fluvial du Niger, se trouvent, paraît-il, de nombreuses vallées fossiles et donc beaucoup de sites possibles du barrage souterrain.

A noter également que la vallée fossile est souvent accompagnée de nappes phréatiques en son sein et en général des basses terres plates d'une étendue importante. Elle est donc potentiellement favorable au développement des cultures irriguées et de l'élevage. Pour cette raison, aussi bien que pour le choix de l'emplacement d'un barrage souterrain, il est souhaitable de déterminer la répartition des vallées fossiles et leurs caractéristiques.

(2) Autres structures géologiques que la vallée fossile

La recherche de sites effectuée dans le présent projet portait également sur le "relief circulaire" et le "relief en étranglement". Mais, nous n'y avons pas trouvé de sites intéressants. Des investigations poussées permettent sans doute d'en trouver dans d'autres structures que la vallée fossile. L'effort que demandent ces investigations serait toutefois beaucoup plus énorme.

(3) Difficulté d'estimer la réserve en eau exploitable

Avant de fixer l'emplacement du barrage souterrain, il faut estimer le volume d'eau susceptible d'être retenue. Mais l'estimation de la "retenue possible" qui est relativement facile pour le barrage en surface se heurte, dans le cas du barrage souterrain, aux difficultés suivantes :

- 1) La couche-réservoir étant formé dans "le sous-sol", il est difficile de déterminer avec précision sa forme et sa capacité.
- 2) La capacité de stockage dépend de la porosité efficace des formations géologiques qui constituent le réservoir. La détermination de la porosité efficace de toutes les parties de la couche-réservoir exige un important effort d'investigation.
- 3) Il est difficile d'estimer avec précision la réalimentation des nappes phréatiques se trouvant dans la couche-réservoir.
- 4) Il est difficile de détecter des "fuites" dans la couche-réservoir et d'établir une prévision des "pertes dues aux fuites".

Dans les projets futurs de barrage souterrain, il convient d'effectuer des investigations plus

détaillées pour estimer avec plus de précision la retenue possible. Un tel effort ne permettrait pourtant pas d'éviter une erreur d'estimation non négligeable. C'est ce dont on doit toujours tenir compte, quand il s'agit de fixer l'emplacement d'un barrage souterrain et d'établir un plan d'utilisation de l'eau retenue.

(4) Choix du site du point de vue socio-économique

Dans le présent projet, compte tenu de son caractère expérimental, la priorité était donnée aux conditions hydrogéologiques pour fixer l'emplacement du barrage souterrain. Pour les barrages souterrains à construire à des fins utilitaires, les facteurs socio-économiques doivent naturellement être pris en considération.

L'utilisation de l'eau retenue par le barrage souterrain nécessite en général des "installations de pompage". Si le barrage est mis en place loin des lieux où est utilisée l'eau retenue, il faudra également des "installations d'alimentation en eau" d'une grande taille. Le coût de ces installations risque alors, dans certains cas, d'être plus élevé que celui de construction du barrage souterrain.

En vue d'un meilleur rapport coût-efficacité, le choix de l'emplacement doit donc être fait en tenant compte également des facteurs suivants :

- Nombre estimé des personnes desservies
- Développement des cultures irriguées et de l'élevage, potentiellement rendu possible par l'eau retenue

Il convient par ailleurs de souligner que dans le réservoir formé par un barrage souterrain, l'eau éventuellement polluée par des apports extérieurs tarde à s'améliorer à cause de la lenteur de sa circulation. Pour éviter une telle pollution causée par des pesticides par exemple, des précautions doivent être prises lors de la mise en valeur des terres se trouvant sur le réservoir.

8-2. Méthodes d'étude

(1) Utilisation de photographies aériennes

La zone d'étude du présent projet étant pour la plupart constitué de terrains plats, nous avons dû faire appel à des photographies aériennes pour y mener la reconnaissance du terrain. Celles-ci constituent toujours un moyen efficace pour la reconnaissance effectuée dans des régions où dominent des pénéplaines, comme en Afrique. Il est donc souhaitable de former à la photo-interprétation les ingénieurs africains participant à des études topographiques et géologiques pour répandre cette technique.

(2) Attention à porter lors de l'observation du niveau de la nappe phréatique

Les "nappes suspendues" observées dans les sédiments de la vallée fossile se trouvant à l'emplacement du barrage souterrain ont fortement influencé les résultats de l'observation du niveau de la nappe phréatique. Il faut donc tenir compte du risque de surestimation de la variation saisonnière du niveau de la nappe phréatique, causée par la présence de nappes suspendues.

A noter également que les nappes suspendues peuvent se trouver non seulement dans les sédiments de la vallée fossile, mais aussi dans le substratum.

(3) Importance des observations hydrologiques (pluviométrie, débit de rivière, niveau d'eau souterrain)

Les études et les évaluations effectuées dans le présent projet se sont heurté à des difficultés dues au manque de données hydrologiques disponibles sur la pluviométrie, le débit de rivière, le niveau d'eau souterrain.

Comme la pluviométrie présente parfois une variation extrême même entre les points relativement rapprochés, il convient d'établir un réseau pluviométrique plus serré dans des régions caractérisées par le manque de ressources en eau, comme le Sahel. D'autre part, les comportements des cours d'eau étant étroitement liés à l'exploitation de l'eau de rivière et des nappes phréatiques, il est préférable de mesurer leur débit en plusieurs de points, même si ces cours d'eau appartiennent au même réseau. Quant au niveau d'eau souterrain, les données collectées dans les puits profonds lors de leur forage étaient relativement bien conservées. Mais les données sur le niveau d'eau dans les puits peu profonds et ses variations saisonnières et intrannuelles étaient peu disponibles. Ces données sont pourtant indispensables pour toute exploitation des ressources en eau souterraine. La mise en place d'un système d'observation et de conservation des données est donc fort désirable.

(4) Etudes à effectuer sur le réservoir réalisé par un barrage souterrain

Comme on l'a vu plus haut dans la section 8-1-(3), la forme, la capacité, les caractéristiques hydrauliques et les "fuites" possibles de la couche-réservoir ne sont pas faciles à définir. Il faut donc donner de l'importance aux études permettant de les déterminer pour réaliser un barrage souterrain.

8-3. Techniques de construction d'un barrage souterrain

(1) Inconvénients du "barrage souterrain en terre"

La technique de construction adoptée pour le présent projet consiste à installer un "barrage en terre" (endiguement en terre) dans le sous-sol. Elle pose pourtant le problème des "venues d'eau" lors de l'exécution des travaux. Dans le présent projet, les venues d'eau en provenance de la fouille dans les sédiments de la vallée fossile n'étaient pas telles qu'il faille prendre des mesures spéciales. Mais si la quantité des eaux phréatiques est importante, il devient difficile d'éviter des venues d'eau et parfois impossible de poursuivre les travaux.

Le barrage souterrain, s'il est à mettre en place à une profondeur importante, nécessite une grande quantité des travaux d'excavation et de remblai et entraîne un coût d'autant plus élevé. Le risque de venues d'eau s'accroît également et exige donc des précautions.

(2) Matériaux de remblai

Dans le présent projet, le corps du barrage a été réalisé avec des matériaux extraits ailleurs. Mais les déblais provenant de la fouille pour le barrage se sont avérés plus tard utilisables.

Le réemploi des déblais, produits par l'excavation, pour exécuter le corps du barrage supprime la nécessité de zones d'emprunt et permet ainsi de diminuer les effets nuisible sur l'environnement. Un tel procédé est à envisager dans les projets futurs de barrage souterrain en terre.

(3) Introduction de la technique dite de parafouille par paroi moulé dans le sol

Dans le présent projet, nous avons retenu, comme type de l'ouvrage, le "barrage souterrain en

terre" dans un souci de mettre en oeuvre le matériel disponible au Burkina Faso. Cependant, le barrage souterrain est, dans son principe de fonctionnement, assimilable au "parafouille" tel qu'il est généralement utilisé pour les travaux de construction. Celui-ci est donc applicable au barrage souterrain. Le "parafouille par paroi moulé dans le sol" est préférable au "barrage souterrain en terre" en particulier lorsque, comme on l'a vu plus haut, une grande quantité des venues d'eau est à craindre, que le barrage est à construire à une profondeur importante ou qu'une réduction du délai est imposée par les travaux qui ne peuvent être exécutés qu'en saison sèche.

Les pays africains occidentaux dont le Burkina Faso voient ces dernières années apparaître une utilisation rationnelle de l'espace urbain limité, représentée par la construction de tours par exemple. Désormais, cet "aménagement urbain" s'étendra probablement jusqu'à l'"exploitation du sous-sol". Et c'est pour une telle "exploitation du sous-sol" que la technique de "paroi moulé dans le sol" avait été mise au point. Cette technique et le matériel de construction nécessaire seront donc introduits tôt ou tard en Afrique occidentale.

Dans cette perspective, la possibilité d'appliquer le "parafouille par paroi moulé dans le sol" sera certainement envisageable dans les projets futurs de barrage souterrain en Afrique occidentale.

8-4. Coûts

Dans le présent projet, les coûts directs de la recherche de sites, de la construction du barrage souterrain et de la mise en place des installations de pompage et d'alimentation en eau sont les suivants. (en millier yens)

- Construction du barrage souterrain 108.595
- Mise en place des installations de pompage et d'alimentation en eau 24.900 (dont une partie est une estimation)

Les coûts directs de la mise en place des installations associées sont les suivants (en millier yens) :

- Installations d'observation de la nappe phréatique 4.160
- Ecluse 16.933
- Champs d'expérience 2.570

Les frais de personnel pour les ingénieurs japonais qui ont assuré la supervision des travaux de construction du barrage souterrain ne sont pas inclus dans les coûts indiqués ci-dessus.

8-5. Système de gestion et d'entretien

Dans le présent projet, aussitôt les installations d'alimentation en eau mises en service, les habitants du village de Kombangbedo ont organisé un "comité de gestion des installations en eau" qui est chargé de percevoir des taxes d'eau. Le "service de nettoyage" des installations a été également organisé.

Quant aux installations équipées de dispositifs sophistiqués, tels que les unités photovoltaïques, leur entretien ne peut sans doute pas être assuré par les habitants à eux seuls. Il faudrait donc mettre en place une structure pour une gestion et un entretien à plus long

terme avec, par exemple, une assistance du gouvernement du Burkina Faso.

Il est à noter toutefois que les unités photovoltaïques mises en place dans le présent projet ne sont pas équipées d'"accumulateur de nuit", appareil sujet à la panne.

La gestion des ressources en eau, y compris l'entretien du barrage souterrain, nécessite une autogestion par les habitants et les autorités locales. Il est donc souhaitable d'établir, sur le principe de la participation de la communauté locale et de ses habitants, une structure d'autogestion dès le stade de l'avant-projet .

Remerciements

Le programme portant sur un projet expérimental de lutte contre la désertification, confié par le Ministère de l'Environnement du Japon, a commencé en 1995 et s'est terminé en mars 2003. Nous avons pu l'accomplir grâce à l'effort soutenu que le Ministère de l'Environnement, Taisei Corporation et tous ceux qui y ont participé ont entrepris pendant ces huit ans.

Les membres du "Comité d'étude pour le programme portant sur un projet expérimental de lutte contre la désertification" (présidé par M. Satoshi Matsumoto, professeur d'alors à la faculté d'agriculture, Université de Tokyo) ainsi que du "Comité d'évaluation du projet expérimental de lutte contre la désertification" (présidé par M. Haruo Miyata, chargé de cours à la section d'étude de la coopération internationale, cours de maîtrise à l'Université de Hiroshima) et beaucoup d'autres nous ont donné des avis et des conseils précieux.

Pour la réalisation du présent projet, différents organismes du Burkina Faso dont notamment le Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie (Ministère de l'Environnement et de l'Eau lors du lancement du projet) et le Secrétariat Permanent du Conseil National pour l'Environnement et le Développement soutenable (S. P. CONED, S. P. CONAGESE lors du lancement du projet) sous tutelle du Ministre de l'Environnement et du Cadre de Vie ainsi que les habitants du village de Naré ont apporté leur entière collaboration au présent projet, sans laquelle nous n'aurions sans doute pas pu obtenir les résultats tels que sont décrits dans le présent rapport.

Le projet étant achevé, qu'il nous soit à nouveau permis, pour terminer le présent rapport, d'exprimer tous nos remerciements à tous ces organismes et à toutes ces personnes pour le soutien qu'ils ont bien voulu nous apporter.

Centre de Coopération Outre-mer pour l'Environnement (OECC)

Le présent rapport est rédigé par :

- Toru KATAYAMA, administrateur à Overseas Environmental Cooperation Center
- Motoo FUJITA, chercheur à Overseas Environmental Cooperation Center (détaché par MU(μ) GIKEN CO., LTD)
- Naoko IWAKAMI, Overseas Environmental Cooperation Center
- Reiko HOSINO, Overseas Environmental Cooperation Center

- Yasuhiro MATSUMOTO, Sous-directeur, Division des Affaires d'Environnement, Bureau d'Environnement Global, Ministère de l'Environnement

Avec la coopération de :

- Yasushi FUJIWARA, Ingénieur en chef de recherches, Institut de recherche au génie civil, Centre technique, TAISEI CORPORATION

Pour tout renseignement adressez-vous à :

- Centre de Coopération Outre-mer pour l'Environnement (OECC) E-mail: oecc@oecc.or.jp
- Division des Affaires d'Environnement, Bureau d'Environnement Global, Ministère de l'Environnement E-mail : chikyu-hozen@env.go.jp