

## 3.2. Géographie

### 3.2.1. Situation

Le fleuve Sénégal, long de 1'800 km, compte parmi les grands fleuves d'Afrique. Il prend naissance dans le Nord de la Guinée, traverse la partie occidentale du Mali puis constitue, sur le reste de son parcours, la frontière entre les territoires de la République du Sénégal et de la République Islamique de Mauritanie.

Dans son cours supérieur, le Sénégal est formé à Bafoulabé par la jonction du Bafing - la branche mère du fleuve - et du Bakoye dont la Baoulé est l'affluent principal. La Falémé qui, comme le Bafing et le Bakoye, prend sa source dans la région montagneuse de Guinée (Fouta-Djalon et Plateau Mandingue) est le principal affluent du fleuve Sénégal en aval de Kayes.

Le bassin du fleuve Sénégal a une surface totale d'approximativement 290 000 km<sup>2</sup> et est situé entre les parallèles 10°30' et 17°30' Nord et les méridiens 7° et 16°30' de longitude Ouest. Il comprend trois régions principales : le Haut-Bassin, la "Vallée" et le "Delta". Ces régions se différencient fortement par leurs conditions géologiques, hydrographiques et climatologiques.

Le point le plus élevé du bassin est à une altitude de 1 372 m (Mont Kavendou près de Dalaba) et l'altitude moyenne de sa partie la plus méridionale est sensiblement voisine de 1000 m (voir annexe 1.02). De là descendent le Bafing et le Téné, premier et important affluent rive gauche du Bafing.

Lorsqu'on se dirige vers le nord, on passe successivement à une série de reliefs subtabulaires d'altitude moindre (800 m environ) et prolongés encore plus au nord par des plateaux culminant à 600 m.

Le massif du Fouta Djalon se situe approximativement entre 11° et 13°00' et entre 10° et 12°30' N. Ces Hauts Plateaux englobent plus de 10 000 km<sup>2</sup> se situant en grande partie au-dessus de 800 m et comprenant les villes de Dalaba, Pita, Labé et Mali. Le Fouta Djalon est le château d'eau de l'Afrique Occidentale : "tel une immense toiture, il déverse ses gouttières en tous sens en donnant origine aux sources de certaines des plus importantes rivières de l'Afrique de l'Ouest, notamment le Bafing et la Falémé (affluents du Sénégal) et la Gambie vers le Nord, le Koumba (affluent du Corubal), le Kogon, la Fatala et le Konkouré vers l'Ouest, le Kolenté et la Kaba vers le sud et le Tinkisso (important affluent du Niger) vers l'Est" (voir annexes 1.02 et 1.03).

Le Haut-Bassin, depuis le Fouta-Djalou jusqu'à Bakel, fournit la quasi totalité des apports car il est relativement humide, les précipitations annuelles étant de 700 à 2000 mm. Ces pluies tombent entre avril et octobre dans la partie montagneuse de l'extrême Sud du bassin et provoquent la crue annuelle du fleuve qui a lieu entre juillet et octobre. Ainsi le Sénégal vivifie une vaste bande de terres entre les régions désertiques de Mauritanie et la zone sèche du Ferlo (Sénégal).

La Vallée, de Bakel à Dagana, est une plaine alluviale encadrée par des régions semi-désertiques. Elle constitue la zone d'inondation dont la largeur est de 10 à 20 km mais qui peut atteindre jusqu'à 25 km. Ce pays agricole est fertilisé chaque année par la crue du fleuve qui, sous une pente très faible, présente de nombreux méandres, forme tout un système de défluent (marigots) et remplit en sortant de son lit mineur, large de 200 à 400 m, de nombreuses cuvettes argileuses appelées oualcs. Les fonds du lit principal sont très variables et coupés par une quarantaine de seuils rocheux ou sableux gênant la navigation en basses eaux.

Le Delta, partie terminale du fleuve Sénégal en aval de Dagana, est apparemment un delta avec de multiples bras mais il n'y a qu'une seule embouchure. Cette vaste zone est complètement plate et pendant la saison sèche elle est envahie par les eaux salées de l'océan. Dans cette partie le fleuve Sénégal est large de 400 à 500 m et est également relativement profond (à certains points jusqu'à 20 m). L'influence de la marée s'y fait sentir notablement.

Les limites du bassin versant du fleuve Sénégal sont assez mal définies au Nord du 15<sup>e</sup> parallèle. En effet, l'aridité du climat et l'uniformité du relief font disparaître progressivement le système hydrographique. La distribution du bassin entre les différents pays intéressés est approximativement la suivante :

- République du Sénégal 27 500 km<sup>2</sup>
- République du Mali 155 000 km<sup>2</sup>
- République Islamique de Mauritanie 75 500 km<sup>2</sup>
- République de Guinée 31 000 km<sup>2</sup>
- Total 289 000 km<sup>2</sup>

Dans le Haut-Bassin, concerné avant tout par cette étude, il convient de distinguer trois sous-régions qui présentent des différences notables quant au climat, à la végétation et aux sols : les régions foutanienne, soudanienne et sahélienne.

### 3.2.2. Morphologie générale (voir annexe 1.02)

L'extrémité méridionale du bassin est très montagneuse. Elle est bordée sur le territoire de la Guinée par le massif du Fouta-Djalon qui culmine à 1540 m s.m. et sur le territoire du Mali par le Plateau Mandingue qui occupe la région située à l'Ouest de Bamako. Dans le reste du bassin, le relief est moins élevé et l'on ne rencontre des altitudes supérieures à 400 m s.m. que dans le massif de l'Affolé au Nord, sur le territoire de la Mauritanie. En outre, et bien que n'atteignant pas 400 m d'altitude, on peut encore signaler le Plateau Tambaoura entre les vallées de la Falémé et du Bafing, le Plateau Assaba entre les vallées du Karakoro et du Gorgol, enfin, les monts Oua-Oua dans le bassin du Gorgol. A l'Est de Kayes, entre les vallées de la Baoulé et de la Kolombiné, le bassin est formé par un vaste plateau au relief très mou, situé entre 200 et 300 m d'altitude. A l'Ouest du méridien 13°, l'altitude devient très faible et reste inférieure à quelques dizaines de mètres. L'altitude moyenne du bassin du fleuve Sénégal est de 220 m.

### 3.2.3. Affluents du fleuve Sénégal (voir annexe 1.01)

Le fleuve Sénégal proprement dit, comme il l'a déjà été mentionné plus haut, est formé par la réunion de deux rivières, le Bafing et le Bakoye, près de Bafoulabé au Mali, à 1 055 km de l'océan Atlantique.

Le fleuve Bafing, dont le nom signifie "rivière noire" en malinké, est long de 760 km et constitue le cours supérieur du fleuve Sénégal. Il prend sa source à une altitude de 800 m environ, dans le Fouta-Djalon à 15 km au Nord-Ouest de Mamou en Guinée. Son bassin versant a une surface de 38 500 km<sup>2</sup>, desquels 17 000 km<sup>2</sup> sont situés en territoire guinéen.

Un affluent important du Bafing est le Téné qui prend sa source près de Dalaba en Guinée à une altitude d'environ 1200 m s.m. Venant de la gauche, il rejoint le Bafing aux environs du village de Boulinko en Guinée. Le Téné a une longueur de 130 km et un bassin versant de 3 900 km<sup>2</sup>. Le cours du Bafing, de sa source jusqu'à sa confluence avec le Téné, a une longueur de 164 km et son bassin versant est de l'ordre de 4 200 km<sup>2</sup>.

Un deuxième affluent important du Bafing est la Kioma qui prend sa source à 30 km à l'Est de Labé, à une altitude approximative de 900 m s.m. La Kioma rejoint le Bafing sur rive gauche près du village de Dalabori en Guinée. Sa longueur est de 83 km et son bassin versant d'environ 1 800 km<sup>2</sup>.

En quittant le Fouta Djalon et la République de Guinée, le Bafing se dirige vers le Nord et traverse les plateaux de la région soudanienne en décrivant un arc de cercle avant d'atteindre Bafoulabé. Ce parcours est caractérisé par la présence de nombreuses chutes et rapides.

Parmi les nombreux affluents du Bafing sur cette partie de son cours, les trois suivants sont à noter :

- le Balé supérieur qui rejoint le Bafing en amont de Bindougou (Mali) sur rive droite à 430 km en aval de la source du Bafing,
- le Balé inférieur qui rejoint le Bafing sur rive droite également en aval de Diba au Mali à 540 km en aval de la source du Bafing,
- le Balinn-Ko, un affluent rive gauche du Bafing dont le bassin versant est d'environ 5 000 km<sup>2</sup> et qui rejoint le Bafing près de Dibia à 665 km de la source de ce dernier.

Bien que le bassin versant du Bafing ne représente que le huitième du bassin versant total du fleuve Sénégal, il amène plus de la moitié du débit total de ce dernier, c'est-à-dire environ 430 m<sup>3</sup>/s en moyenne.

Le deuxième affluent principal du Sénégal est le Bakoye qui signifie "rivière rouge" en malinké; il a une longueur de 640 km et un bassin versant d'environ 87 000 km<sup>2</sup>. Les données relatives à la surface du bassin versant varient cependant d'une manière sensible selon la source consultée. Sa source se trouve à environ 80 km au Nord-Ouest de Siguiri en Guinée, à proximité de la limite méridionale du Plateau Mandingue en Guinée, à une altitude d'environ 500 m s.m. Après 520 km, juste en aval de Toukoto au Mali, le Bakoye est rejoint par son seul affluent important, la Baoulé (rivière blanche en malinké). Entre Pangala et Badoumbé, le Darouma et le Kouaga, deux affluents de moindre importance rejoignent le Bakoye. A sa confluence avec le Bafing, le Bakoye a un débit annuel moyen d'environ 170 m<sup>3</sup>/s. Cette rivière passe également un assez grand nombre de petites chutes et de rapides.

La Baoulé, qui a une longueur d'environ 470 km et un bassin versant de 59 000 km<sup>2</sup>, prend sa source à 42 km au Sud-Ouest de Bamako, à une altitude d'environ 600 m s.m. Son débit annuel moyen de 60 à 70 m<sup>3</sup>/s est bas comparé à l'étendue de son bassin versant. Ceci est dû évidemment à la diminution progressive des précipitations lorsqu'on se dirige vers le Nord. La Baoulé coule d'abord en direction du Nord et parcourt ensuite un long arc de cercle pour se diriger vers le Sud-Ouest. Les affluents principaux de la Baoulé sont le Kénié, le Kéniéba-Ko

et le Badinn-Ko, tous venant de la rive gauche, et le Dla ainsi que le Dlaba et la Vallée du Serpent venant de la rive droite. La Vallée du Serpent n'apporte pratiquement aucun débit en raison du climat sahélien de la région.

En aval de Bafoulabé, les affluents principaux du fleuve Sénégal venant de la rive droite sont les suivants :

- Ye Kétiou-Ko qui s'écoule du massif doléritique au Nord de Bafoulabé.
- la Kolombiné qui prend sa source dans le massif de l'Affolé dans la région du Sahel et qui rejoint le Sénégal à 5 km en amont de Kayes, c'est-à-dire à 930 km en amont de Saint-Louis après avoir passé la dépression marécageuse de Magui. Le bassin versant de la Kolombiné, étant donné le caractère désertique de sa partie septentrionale, est difficile à définir. Son étendue devrait néanmoins être comprise entre 20 000 et 50 000 km<sup>2</sup>. Le débit annuel moyen de la rivière peut être estimé à environ 20 m<sup>3</sup>/s.
- le Karakoro qui rejoint le Sénégal 850 km en amont de Saint-Louis entre Kayes et Bakel. Ce cours d'eau a son origine au Nord de Kiffa en Mauritanie. Son bassin versant devrait être de l'ordre de 25 000 à 40 000 km<sup>2</sup> et son débit annuel moyen peut être estimé entre 10 et 15 m<sup>3</sup>/s.
- en aval de Bakel, les affluents principaux sont les oueds Niordé et Ghorfa qui rejoignent le fleuve Sénégal entre Ouaoundé et Matam, le Gorgol qui se jette dans le Sénégal juste en amont de Kaédi et l'oued Savalel qui rejoint le Sénégal à environ 30 km en aval de Kaédi.

Sur rive gauche, le Sénégal n'a qu'un seul affluent important, la Falémé. Cette rivière se jette dans le fleuve Sénégal à environ 50 km en amont de Bakel, c'est-à-dire à 825 km en amont de Saint-Louis. Elle prend sa source dans la partie Nord du Fouta Djallon, à environ 30 km au Nord-Est de Tougué en Guinée, à une altitude d'environ 800 m s.m. La Falémé a une longueur de 650 km et son bassin versant est de 29 000 km<sup>2</sup>. Son débit annuel moyen, à son débouché dans le fleuve Sénégal, est d'environ 200 m<sup>3</sup>/s. La Falémé n'est rejointe par des affluents d'une certaine importance que dans sa partie supérieure où l'on rencontre entre autres le Kouloun-Ko sur rive droite et le Balinn-Ko ainsi que le Koila-Kabé sur rive gauche.

Près de Bakel, qui est normalement considéré comme la limite entre le Haut-Bassin et la Vallée, le fleuve Sénégal atteint son débit annuel moyen maximum d'environ 780 m<sup>3</sup>/s. En aval, le module décroît notablement par suite de la forte évaporation pendant l'hivernage (juin à

octobre. Pendant la saison sèche, la langue d'eau salée de l'océan remonte le fleuve souvent jusqu'à un point situé à 200 km en amont de Saint-Louis.

#### 3.2.4. Profil en long du fleuve Sénégal (voir annexe 1.04 et 1.05)

Le fleuve Sénégal proprement dit conserve dans son cours supérieur entre Bafoulabé et Kayes les caractéristiques qui sont celles de ses affluents principaux dont les vallées sont constituées par une succession de bassins séparés par des seuils rocheux formant des chutes ou des rapides.

Dans le Haut-Bafing, en amont de la frontière entre le Mali et la Guinée, la pente moyenne varie entre 2 m par km et environ 50 cm par km. Elle a tendance à décroître en aval bien qu'il y ait dans cette partie plusieurs rapides en amont de Dibia (en particulier ceux de Tina). Plus à l'aval, entre Dibia et Bafoulabé, la pente est d'environ 25 cm par km.

La pente moyenne du Bakoye supérieur est de 1 à 2 m par km, tandis que celle de la Baoulé décroît de 2 m par km en amont, à environ 30 cm par km près de sa confluence avec le Bakoye. Ce dernier cours d'eau a une pente nettement plus importante sur toute la longueur de son cours en amont de ce point. En revanche, entre la confluence de la Baoulé et Bafoulabé, la pente moyenne du Bakoye diminue jusqu'à environ 40 cm par km.

Après la jonction du Bafing et du Bakoye, le fleuve Sénégal proprement dit franchit des bancs durs de grès infra-cambrien par des rapides comme ceux de Talari et des chutes comme celles de Gouina et de Félou. Ainsi le Sénégal perd environ 70 m de chute jusqu'à Kayes, c'est-à-dire sur une longueur de 130 km, ce qui correspond à une pente moyenne de 55 cm par km.

Entre Kayes (module 636 m<sup>3</sup>/s, altitude 23,4 m s.m. IGN) et Bakel (module 780 m<sup>3</sup>/s, altitude 15,6 m s.m. IGN), la pente moyenne diminue progressivement jusqu'à 6 cm par km sur une longueur de 130 km. On note quelques bancs rocheux émergeant à l'étiage et rendant la navigation difficile sur cette partie du fleuve.

En aval de Kayes, le fleuve Sénégal a une largeur d'environ 400 m et coule dans un lit assez bien marqué avec des berges de 10 à 12 m de hauteur.

La Falémé, dernier affluent important du Sénégal, a une pente assez forte de 9,5 m par km dans son cours supérieur. Néanmoins, ce gradient diminue progressivement pour atteindre environ 15 cm par km près de la confluence de la Falémé et du Sénégal.

En aval de Bakel, la pente diminue encore plus. Ainsi elle n'est plus que de 3 cm par km entre Bakel et Matam, de 1 cm par km dans le tronçon Podor - Richard-Toll et de 0,6 cm par km dans le Delta. Pendant la crue, le gradient augmente sensiblement. Ainsi, sur le tronçon Bakel-Matam, des pentes jusqu'à 5 cm par km et dans le Delta jusqu'à 1 cm par km peuvent être observées.

### 3.3. Topographie

SENEGAL-CONSULT a utilisé les cartes existantes de l'Institut Géographique National (IGN) au 1 : 500 000 et 1 : 50 000 pour ses premières reconnaissances sur le terrain dans la zone des projets et pour les premières esquisses d'avant-projet qui devaient permettre de recenser les sites à cartographier à plus grande échelle. La Direction du projet avait également mis à disposition les cartes existantes au 1 : 10 000 et 1 : 1 000 du bassin d'accumulation et du site de Couina.

SENEGAL-CONSULT a sous-traité à IGN, Paris, la cartographie au 1 : 20 000 des principaux bassins pouvant entrer en ligne de compte pour une régularisation totale du fleuve. A cet effet, IGN a réalisé, en territoire malien, sur la Falémé, le Bafing et le Bakoye, une couverture aérophotogrammétrique au 1 : 40 000 et des profils APR. Des restitutions au 1 : 20 000 avec équidistance de 5 m ont été effectuées pour les bassins d'accumulation de Gourbassi (667 km<sup>2</sup>), Manantali (846 km<sup>2</sup>), Badioumbé (682 km<sup>2</sup>) et se sont étendues au total sur 2 195 km<sup>2</sup>.

La couverture aérophotogrammétrique de la région guinéenne existait déjà dans les dossiers du sous-traitant. Les surfaces de bassins d'accumulation restituées au 1 : 20 000 sont : Koukoutamba (129 km<sup>2</sup>) et Boureya (354 km<sup>2</sup>) soit au total 483 km<sup>2</sup>. Comme il l'a été dit au paragraphe 2.4.4.2 la zone restituée dans le bassin de Koukoutamba a été agrandie ultérieurement à la demande des Nations Unies. Pour le Mali et la Guinée, c'est au total de 2 678 km<sup>2</sup> qui ont été restitués en vue de l'étude finale.

SENEGAL-CONSULT a effectué la stéréopréparation et la couverture aérophotogrammétrique des sites de barrage. Pour les sites maliens, cette couverture au 1 : 8 000 a porté sur 140,5 km<sup>2</sup> avec stéréopréparation et sur 116 km<sup>2</sup> sans celle-ci.

En Guinée, la couverture aérophotogrammétrique a été faite sur un total de 404,5 km<sup>2</sup>, soit 31 km<sup>2</sup> au 1 : 8 000 avec stéréopréparation, 95 km<sup>2</sup> au 1 : 10 000 et 278 km<sup>2</sup> au 1 : 20 000 sans stéréopréparation.

La couverture aérophotogrammétrique représente au total, pour le Mali et la Guinée, 661 km<sup>2</sup>. Elle a été faite avec des recouvrements de photos dans la ligne de vol entre 60 et 70 %; il en est de même pour la couverture aérophotogrammétrique IGN au 1 : 40 000.

Les restitutions au 1 : 2 000, avec équidistance de 1 et 2 m, des sites se sont étendues, pour le Mali, sur 30,05 km<sup>2</sup> et pour la Guinée sur 3,92 km<sup>2</sup>, soit au total 33,97 km<sup>2</sup>.

Pour la cartographie au 1 : 2 000 qui a été faite en coordonnées relatives, SENEGAL-CONSULT a appliqué le système de transformation Halmer pour les ramener aux coordonnées du système IGN.

### 3.4. Géologie générale

#### 3.4.1. Introduction

La région étudiée comprend le bassin du Sénégal à l'amont de Bakel et ceux de ses affluents, les rivières Falémé, Bafing, Bakoye et Baoulé.

L'interprétation de la géologie générale est basée essentiellement sur la carte du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Dakar (BRGM), publiée en 1960 à l'échelle 1 : 2 000 000. Cette carte est une synthèse de tous les travaux antérieurs effectués généralement à l'occasion de recherches minières ou pétrolières, notamment par H. Hubert, L. Baud, R. Dars, M. Zimmermann, C. Bense, J.P. Bassot, M. Arnould, J. M. Aymé et R. Guillaume.

Dans le domaine plus restreint des aménagements hydro-électriques, il faut mentionner les études de L. Renaud, M. Gautier, J. Archambault, J. Delpy, J. Tricart de la mission Technoexport, ainsi que celles de P. Michel sur la morphologie et de S. Pereira-Barreto sur la pédologie.

#### 3.4.2. Morphologie

Les données géographiques générales sont décrites dans le chapitre 3.2.

P. Michel distingue quatre grandes zones morphologiques, à savoir :

- des reliefs anté-quaternaires non érodés,
- un haut glacis cuirassé,
- un bas glacis non cuirassé.

Les glacis sont des plaines d'érosion faiblement inclinées vers le thalweg. Le cuirassement ou formation d'une cuirasse latéritique correspond à un arrêt dans l'abaissement de la nappe phréatique pendant une période climatique humide. Le haut glacis a été entièrement érodé dans la région et ne subsiste que très localement ailleurs. Le bas glacis, de formation récente, n'a subi qu'une faible latéritisation sans cuirassement.

- Les reliefs anté-quaternaires forment le Plateau Mandingue s'étendant d'une part au Sud du fleuve Sénégal jusqu'au Fouta Djallon et d'autre part entre Kayes et Nioro au Nord du fleuve Sénégal. Ils s'élèvent d'un jet à quelques centaines de mètres au-dessus de la plaine en une corniche rectiligne. Leur surface très légèrement ondulée a subi une latéritisation au cours du Secondaire et du Tertiaire.
- Le moyen glaciais cuirassé est visible dans le bassin de la Falémé et partiellement dans ceux du Bafing et du Bakoye. Il caractérise les hautes régions situées en bordure des reliefs antéquaternaires. Après son cuirassement, le moyen glaciais a été érodé dans le bas pays où il est graduellement remplacé par le bas glaciais.
- Le bas glaciais couvre le Haut-Bassin du fleuve Sénégal jusqu'à Bakel, le Bas-Bassin de la Falémé ainsi que les vallées moyennes et inférieures des affluents du Sénégal.

### 3.4.3. Unités géologiques

Le bassin du fleuve Sénégal et de ses affluents est compris dans des unités géologiques anciennes. A l'exception de certaines roches éruptives, aucun dépôt important ne s'est fait postérieurement au Paléozoïque Moyen.

Les unités géologiques sont les suivantes, par ordre chronologique :

#### - Le socle précambrien

Birrimien, faciès schisteux

Birrimien, faciès à roches vertes

Granite syntectonique

Granite posttectonique

#### - L'Infra-Cambrien

Grès quartzeux, pélite

#### - Le Cambrien

Tillite, dolomie, pélite

#### - L'Ordovicien

Grès

- Les intrusions post-ordoviciennes

Dolérite

- Les dépôts récents

Latérite et alluvions

La carte générale (voir annexe 1.05) illustre la disposition de ces unités dans le bassin du Sénégal.

- Le socle précambrien

Il affleure dans le bassin de la Falémé et du Bafing guinéen. Dans le bassin de la Falémé il est bordé au Sud par le massif Cambrien du Fouta Djalou et, à l'Est, par la falaise Infra-Cambrienne de la Tambaoura. Dans le bassin du Bafing, il affleure au Sud et à l'Est où il est limité par le massif Infra-Cambrien et Cambrien du Fouta-Djalou.

Ce sont des séries sédimentaires et volcaniques métamorphosées, orientées du SSO au NNE et comprenant des schistes, des quartzites, des pélites et des calcaires d'une part, des métaandésites et des ophiolites d'autre part. Ces séries métamorphiques ont été traversées à l'Ouest et au Sud par deux intrusions granitiques syn et post-tectoniques. Au cours du Birrimien, une orogénèse a surélevé les séries métamorphiques qui formèrent une chaîne importante. Par la suite, cette chaîne a été pénéplainée par l'action des rivières locales qui ont entraîné leurs alluvions sur le pourtour du socle. Dans le bassin du Bafing guinéen, il est représenté par des gneiss et des granites syntectoniques.

- L'Infra-Cambrien

Les roches détritiques de l'Infra-Cambrien forment tout le Plateau Mandingue et s'étendent sans interruption de Kayes à Bamako. Elles sont limitées au Nord par la grande faille de Kayes-Toukoto et au Sud par le Fouta Djalou.

Cette unité est caractérisée par une puissante épaisseur de grès quartzeux et feldspathiques à stratification entrecroisée. Des grauwackes, des pélites et des jaspes s'intercalent fréquemment dans la série quartzreuse sous forme de lits peu épais.

L'Infra-Cambrien forme actuellement un plateau subhorizontal fracturé par un réseau de fissures rectilignes. Après une émergence générale

la région a subi un refroidissement qui marqua une grande partie du continent africain.

#### - Le Cambrien

Une moraine pétrifiée s'étendit sur la région pendant cette période glaciaire; par sa continuité et son extension, elle représente un remarquable niveau-repère qui définit la limite inférieure du Cambrien.

A la suite de cette période froide, le climat s'est normalisé, permettant la sédimentation de dépôts marins classiques. On trouve une succession de dolomies, de jaspes et de pélites s'accumulant sur une grande épaisseur. Ces dépôts affleurent surtout au Nord du fleuve Sénégal et dans le massif du Fouta Djallon. Tout comme l'Infra-Cambrien, les séries cambriennes n'ont subi aucun plissement mais en revanche, de nombreux déplacements verticaux. Morphologiquement, ces séries forment des collines molles à flancs ravinés contrastant fortement avec les corniches verticales des tables de l'Infra-Cambrien. Dans le massif de Kaarta, qui sépare la région de Niore du fleuve Sénégal, ces collines sont protégées de l'érosion par d'importants "sills" doléritiques. Dans le Fouta Djallon, ces roches ont été très vivement latéritisées et n'affleurent que très localement.

#### - Les intrusions doléritiques

Des roches filoniennes, généralement des dolérites, se sont intercalées dans les séries sédimentaires et métamorphiques sous la forme de "sills" parfois très étendus ou, moins fréquemment, de petits "dikes". Ces intrusions sont disséminées dans toute la région par amas dont les plus importants forment le Fouta Djallon et le massif de Kaarta. Dans le Plateau Mandingue, elles affleurent en petits "sills" ou en "dikes" dirigés selon les fractures de la roche encaissante.

Ces dolérites sont souvent quartzifères; leur structure est isophitique ou microgrenue (norites). Elles contiennent des plagioclases, de l'augite chloritisée et épidotisée, de la biotite, des oxydes de fer, du quartz et, parfois, de l'hypersthène.

Les intrusions n'ont provoqué qu'un très léger métamorphisme de contact qui n'affecte sélectivement que les séries pélitiques ou calcaires. D'après des corrélations faites en Guinée, il semble qu'elles soient mises en place postérieurement à l'Ordovicien.

### - Les dépôts récents

La latérite et les alluvions fluviatiles constituent les formations récentes les plus importantes.

Le terme de latérite est employé ici dans son sens large qui comprend les altérations du bedrock avec accumulation de fer. Granulométriquement, la latérite se présente sous diverses formes, argile à concrétions, gravillon et croûte résistante appelée cuirasse. La succession varie en fonction du milieu physico-chimique, le terme ultime de l'évolution étant très fréquemment le cuirassement.

Les dépôts alluviaux consistent généralement en sables argilo-limoneux accumulés le long du lit apparent. Ils forment souvent des berges surhaussées ou levées, dominant le thalweg de 2 à 5 m. Les dépôts alluviaux graveleux sont rares et sont localisés dans le lit des fleuves à l'amont des seuils rocheux ou dans les creusements du thalweg.

### 3.4.4. Tectonique

Le Haut-Bassin du Sénégal dessine un immense synclinal orienté NE-SO, c'est le synclinal guinéen, d'âge post-cambrien et limité à l'Ouest et à l'Est par deux fenêtres découvrant le socle précambrien dans le cours de la Falémé d'une part et en Guinée, dans le cours supérieur du Bafing d'autre part.

L'histoire tectonique de cette région se caractérise par une intense orogénèse d'âge birrimien, suivie de petits mouvements, généralement verticaux et provenant du socle, qui ont affecté les unités géologiques jusqu'à la fin du Primaire. De plus, il existe des preuves morphologiques de mouvements plus récents d'âge quaternaire, trop faibles pour provoquer des fractures mais suffisants pour modifier le régime des rivières.

Progressant du NO au SE, l'orogénèse birrimienne a intensément replissé le socle précambrien. L'orientation des plis est NE-SO et les pendages des couches sont fortement inclinés, ce qui contraste avec les pentes subhorizontales des séries postérieures.

Par la suite, de nombreux mouvements verticaux se sont produits en affectant l'Infra-Cambrien et le Cambrien. De ces mouvements est résultée la formation du massif du Fouta Djallon dont l'élévation s'est accompagnée d'importantes intrusions doléritiques.

Au Nord, le grand accident de Kayes-Toukoto est un témoin visible de ces mouvements. Le compartiment NE de cette faille normale s'est enfoncé par rapport au bloc SO, mettant ainsi en regard les grès de l'Infra-Cambrien et les schistes du Cambrien.

Les séries subhorizontales montrent souvent de nets basculements à proximité de cet accident. Le Haut-Sénégal et la Basse-Baoulé s'écoulent parallèlement à cette faille qui se poursuit sans interruption de Kayes à Toukoto.

Au Sud de Kayes, l'accident se subdivise en deux branches dont l'une orientée à l'ENE, s'éteint après 90 km. La branche principale se poursuit, en passant au Sud du site de Félou et au NE des sites de Gouina et de Galougo; peu à l'amont du site de Dioubéba, elle s'incurve au Sud et traverse le Bakoye à Oualia en laissant le site de Badoumbé à l'Est. Quelque 15 km au Sud de ce site, la faille reprend sa direction Est-Ouest jusqu'à Toukoto au-delà duquel elle n'a pas été reconnue.

D'après les observations de terrain et les données bibliographiques, la faille n'a pas rejoué postérieurement à sa formation.

En conclusion, la région peut être considérée comme très stable, n'ayant pas subi de déformation tectonique depuis la fin du Paléozoïque.

#### 3.4.5. Le bassin du Sénégal

Le profil du Sénégal entre Bafoulabé et Kayes est intimement lié à la géologie. En effet, on peut distinguer successivement :

- des plateaux gréseux, légèrement inclinés vers l'amont, que le fleuve traverse selon une suite de rapides à Gouina et à Félou, alternant avec
- des plaines recouvertes d'alluvions sableuses formées soit par le sommet de la dalle gréseuse de l'Infra-Cambrien à Bafoulabé, soit par les séries tendres du Cambrien à l'amont du Félou et dans la région de Kayes. Notons en passant que le seuil de Kayes est dû à une intrusion granodioritique attribuée à la série birrimienne.

La dalle gréseuse de Félou ne se prête qu'à un aménagement très modeste du même type que l'usine actuelle en raison de sa morphologie très plate. Toute élévation du plan d'eau excédant quelques mètres noierait une zone latérale étendue où des pertes importantes seraient à craindre, soit par évaporation, soit par infiltration le long des zones de fractures des grès.

Les chutes de Gouina et le site de Galougo forment tous deux un resserrement de la vallée, le premier étant plus large et moins marqué que le second. Les deux sites se trouvent dans le complexe infra-cambrien qui, à Galougo, est formé uniquement de grès très homogènes, alors qu'à Gouina la série gréseuse et pélitique a subi une intrusion de dolérite et un léger métamorphisme local.

#### 3.4.6. Le bassin de la Falémé

Du pied du Fouta Djallon à sa confluence avec le Sénégal, la Falémé s'écoule en dessinant de grands méandres dans une plaine d'érosion parsemée de petits inselbergs ou de buttes latéritiques, témoins des glacis cuirassés. Des études géologiques récentes ont mis en évidence de nombreux surcreusements du bedrock cachés par une couverture uniforme d'alluvions limonosableuses. Le bedrock appartient en grande partie au Birrimien avec des intrusions granitiques syntectoniques. L'altération a intensément attaqué les roches qui n'apparaissent à l'état frais que dans le lit des rivières. En conséquence, aussi bien du point de vue morphologique que géologique, le bassin de la Falémé présente de sérieux inconvénients à tout projet de barrage. Le site de Gourbassi est le seul emplacement du bas bassin où la morphologie s'y prête tant soit peu. Dans le bassin supérieur, le site de Moussala ne paraît pas particulièrement favorable alors que plus à l'amont, les conditions géologiques semblent nettement meilleures.

#### 3.4.7. Le bassin du Bafing

Le cours du fleuve se caractérise par une alternance de biefs et de seuils rocheux que le Bafing n'a pas eu la puissance d'éroder et qui forment des rapides ou de petites chutes.

Ce bassin se situe dans sa partie supérieure, dans le socle birrimien et, dans sa partie inférieure, dans le complexe infra-cambrien subhorizontal qui forme l'immense Plateau Mandingue.

Il est caractérisé par des alternances de massifs gréseux épais et résistants d'une part, formant des reliefs tabulaires dominant la plaine de quelques centaines de mètres et, d'autre part des séries de roches plus friables et plus altérables, telles que pélites, grauwackes

et jaspes qui sont recouvertes par des dépôts superficiels ou de la latérite et qui n'apparaissent donc pas dans la morphologie. Des intrusions éruptives, généralement des dolérites, traversent parfois ce complexe notamment dans la partie guinéenne. Dans cette zone-ci, émergent de la plaine des buttes-témoins arrondies en inselbergs provenant généralement des granites birrimiens.

Les sites de Koukoutamba et Boureya ont été choisis parmi d'autres pour la qualité des affleurements rocheux sur rive droite et dans le lit du fleuve.

Le bas bassin se trouve au Sud de la grande faille de Kayes-Toukoto et aucun mouvement tectonique important n'a affecté le complexe infra-cambrien. De grandes fissures élargies par l'altération sillonnent le bedrock selon des réseaux très réguliers.

Le site de Manantali se trouve dans un rétrécissement de la vallée du Bafing; il est situé à la limite septentrionale de l'érosion du relief tabulaire. Plus à l'amont, on peut observer de nombreux seuils rocheux du même type que les chutes de Félou qui ne présenteraient d'intérêt que pour des aménagements du même genre à l'exception d'un site relativement étroit à Bindougou.

#### 3.4.8. Le bassin du Bakoye

Il est caractérisé par deux zones distinctes soit, d'une part le plateau gréseux infra-cambrien à l'amont de Toukoto et d'autre part, deux plaines d'érosion séparées par le massif doléritique de Kaarta à l'aval.

La plaine supérieure s'étendant de Toukoto à Badoumbé est comprise dans la partie inférieure de la série cambrienne qui a été par endroits érodée jusqu'au soubassement infra-cambrien.

La plaine inférieure a été formée au dépend du complexe infra-cambrien qui présente quelques variations lithologiques locales.

Le Bakoye traverse donc deux fois l'accident tectonique majeur de Kayes-Toukoto, premièrement peu à l'amont de celui-ci puis à l'aval de Badoumbé.

A l'amont de Toukoto, le Bakoye est freiné par de nombreux seuils gréseux appartenant à l'Infra-Cambrien. Le site de Boudofora a été pris en considération malgré l'absence de bases topographiques ce qui rend l'étude aléatoire. En dépit de tout, les observations du terrain montrent que le site est compris dans une série gréseuse homogène. Cette série a subi une assez forte altération qui s'est développée spécialement dans les nombreuses fractures. L'étude détaillée de ce site exigerait de nombreuses investigations souterraines.

Situées entre Toukoto et Badoumbé, les chutes de Billy présentent les mêmes conditions topographiques que celles de Férou et conviendraient éventuellement à un petit aménagement. Géologiquement, ces chutes sont situées dans une série conglomératique qui se place stratigraphiquement à la partie inférieure du Cambrien. La tillite située 15 km à l'amont matérialisant le contact avec l'Infra-Cambrien.

Le site de Badoumbé est très favorable au point de vue géologique. Le bedrock subhorizontal est composé de pélites et grauwackes. Le bedrock subhorizontal est composé de pélites et grauwackes cambriennes surmontées d'un "sill" doléritique très étendu. Cependant, il présente l'inconvénient morphologique d'avoir une section transversale de plus de 2,5 km.

#### 3.4.9. Le bassin de la Baoulé

Le cours inférieur de la Baoulé présente seul quelque intérêt pour une retenue importante. La Baoulé a creusé un lit encaissé mais peu élevé dans le plateau gréseux infra-cambrien jusqu'à la hauteur de Maréla. A l'aval de ce point, elle traverse une vallée largement ouverte où affleurent les pélites tendres du Cambrien et rejoint le Bakoye à l'aval de Toukoto.

Les possibilités de barrage sont donc limitées au tronçon de 135 km compris entre l'embouchure de la rivière Koya à l'extrême Nord et le village de Maréla au Sud-Ouest.

C'est aux environs de Maréla que les conditions topographiques semblent les meilleures. Le fleuve est bordé de collines plus élevées qu'à l'amont, ce qui permettrait l'édification d'un ouvrage important. Géologiquement, on se trouve en présence de roches très diverses ce qui est dû à une intrusion doléritique ainsi qu'à la proximité du contact entre le Cambrien et l'Infra-Cambrien. De plus, la situation est compliquée par la présence d'une faille traversant le site en son milieu.

### 3.5. Météorologie et climatologie

Le bassin du Sénégal est caractérisé par trois régions bien distinctes : la région foutanienne où règne un climat tropical et dans laquelle les principaux affluents du fleuve ont leur source, la région soudanienne, située plus à l'Est et la région sahélienne qui recouvre la partie Nord du bassin avec un climat semi-aride. Le réseau climatologique est présenté dans l'annexe 1.06.

La température moyenne annuelle varie, selon les régions, entre 23 et 29° C, s'accroissant légèrement du Sud vers le Nord. Les températures mensuelles maximales sont observées généralement en avril-mai, c'est-à-dire dans le mois qui précède la saison des pluies. (voir annexe 1.10)

Les vents dominants viennent en général du secteur Nord à Nord-Est. L'alizé, maritime, frais et humide et longeant la côte, se fait sentir par intermittence à l'intérieur du continent et fait place au sol, à partir de mars, au vent continental de l'Est, l'harmattan, chaud et très sec. Ce vent se heurte aux courants de mousson, tièdes et humides, soufflant du Sud. Il domine au mois d'août sur l'ensemble du bassin.

Les valeurs annuelles moyennes de l'humidité relative se situent généralement entre 50 et 60 % alors que les plus fortes valeurs mensuelles dépassent le plus souvent 90 % et les plus faibles atteignent 10 à 20 % selon les régions.

Le bassin du fleuve Sénégal fait l'objet des mesures d'évaporation depuis une vingtaine d'années. L'évaporation potentielle annuelle varie selon les régions, entre 1 500 mm (dans la zone guinéenne) et plus de 3 000 mm dans le Nord du bassin. A Kayes, elle atteint une moyenne de 2 400 mm environ (voir annexe 1.09).

Le bassin est équipé d'un réseau d'observations pluviométriques relativement dense et bien distribué qui a permis de recueillir des mesures de précipitations de bonne qualité. La carte des isohyètes de la pluviométrie annuelle moyenne a ainsi pu être tracée; elle montre que la pluviosité varie considérablement à l'intérieur du bassin, passant de 2 000 mm sur le flanc méridional à 250 mm seulement sur la limite septentrionale (voir annexe 1.02).

Les précipitations qui sont souvent de caractère orageux varient également fortement d'une saison à l'autre. Alors qu'elles atteignent leur maximum mensuel de juillet à septembre, elles sont pratiquement nulles en dehors de la saison des pluies. Cette dernière est plus longue dans le Sud (avril-novembre) que dans le Nord où elle se limite à une durée de 3 mois environ. Il est à remarquer aussi une autre caractéristique climatique qui réside dans l'augmentation de l'irrégularité des pluies à mesure que l'on s'approche de la zone désertique, alors que la pluviosité diminue. La hauteur des précipitations peut varier d'une année à l'autre dans le rapport 1 : 4 ou même 1 : 6.

### 3.6. Hydrologie

Contrairement à ce qui s'est passé pour les caractéristiques climatologiques (évaporation, précipitations) qui n'ont fait l'objet d'observations que relativement récemment, les débits du fleuve Sénégal et ceux de ses principaux affluents ont été mesurés, bien qu'avec certaines interruptions, dès le début du siècle et cela en relation avec la navigation fluviale. A la suite de l'installation de nouvelles échelles par différents organismes, un nombre considérable de mesures ont été effectuées, dont certaines cependant ne peuvent être utilisées qu'avec une certaine prudence, étant donné les méthodes de jaugeage employées, parfois incorrectes. Cependant l'étude hydrologique peut s'appuyer sur la base relativement solide que représente une douzaine de stations importantes. (voir annexes 1.07 et 1.08) La station la plus intéressante se trouve être celle de Bakel sur le Sénégal, en aval des principaux affluents du fleuve, pour laquelle des lectures complètes existent sur 65 années consécutives.

L'analyse détaillée des débits moyens mensuels et annuels et le contrôle des variations relatives de ces valeurs pour l'ensemble, effectués par SENEGAL-CONSULT en collaboration avec le Service de l'Hydraulique, ont permis de mettre en évidence un certain nombre d'anomalies et de procéder à une correction correspondante dans la mesure où cela était possible. Des lacunes de lecture ont pu être comblées et les périodes d'observation étendues à 65 années grâce à des calculs de corrélation. Les valeurs des débits moyens sur une longue période à disposition pour une douzaine de stations ont pu ainsi constituer la base de l'étude préliminaire de la régularisation. Un contrôle des débits a été entrepris par examen du bilan des apports relatifs à un certain nombre de stations. Cette partie d'étude n'a pas abouti, du moins pour certaines stations, aux résultats escomptés, des différences assez importantes étant en effet apparues dans les bilans examinés (cela a été en particulier le cas pour Bakel où un déficit de l'ordre de 6 % a été calculé). Les divergences obtenues proviennent essentiellement du caractère non univoque des courbes de tarage et des phénomènes de modifications des caractéristiques du lit du fleuve qu'engendre le passage des crues (voir annexe 1.12). Une tentative d'explication du déficit à Bakel a été faite par une méthode empirique faisant intervenir les courbes de hauteurs - débits de certaines années au cours desquelles les mesures ont été nombreuses.

En ce qui concerne le bilan des écoulements, un certain retard de la pointe de crue de même que des discordances apparaissent par rapport au maximum d'intensité des précipitations. Le coefficient d'écoulement, dont la valeur moyenne atteint 18,2 % à Bakel, varie considérablement selon l'importance, la durée et la fréquence des averses et dépend

également de l'état de saturation des terrains. Bien que la variation des précipitations ne dépasse pas + 20 % entre les années humides et les sèches, des fluctuations du débit total allant jusqu'à + 60 %, comparées à la moyenne, ont été mesurées à Bakel. A cette station le volume moyen annuel d'eau écoulée s'élève à 24 milliards de m<sup>3</sup> environ (débit correspondant : 771 m<sup>3</sup>/s) alors que le volume moyen des pluies tombant sur le bassin actif du Sénégal (140 000 km<sup>2</sup>) peut être estimé à 133 milliards de m<sup>3</sup> ce qui correspond à une perte, essentiellement due à l'évapotranspiration, de 103 milliards de m<sup>3</sup>.

Parmi les 65 années d'observation, un certain nombre d'années sont particulièrement humides (1906, 1922, 1936, 1950, 1958) alors que d'autres (1902, 1913, 1944, 1968) ont une hydraulicité exceptionnellement faible. Tant les unes que les autres ont été défavorables pour la population, provoquant soit des dégâts d'inondation, soit réduisant tragiquement le rendement agricole dans la Vallée.

La détermination des volumes d'apport des différentes années en fonction de leur fréquence d'apparition a été basée sur la méthode statistique de Gauss, avec un contrôle dans certains cas par application des lois de Pearson. C'est ainsi qu'ont pu être calculés les volumes pour des années caractéristiques de fréquence 1/100 et 1/1000.

L'hydrogramme général des crues présente d'année en année des irrégularités notables tant par l'amplitude de l'onde que par la date du maximum et la vitesse de propagation. Cette irrégularité inter-annuelle constitue une véritable plaie pour la Vallée (variation de la surface cultivable, date de la décrue, etc.). L'amplitude de la crue est généralement atteinte à Bakel en septembre. Le temps de propagation de l'onde dépend des caractéristiques du lit du fleuve et de ses affluents et varie entre 80 et 170 km/jour. La série de biefs étagés qui jalonne le profil en long du Sénégal représente une capacité de rétention non négligeable puisqu'entre Galougo et Bakel, le volume accumulé peut atteindre 1 milliard de m<sup>3</sup> pour une crue de 7 000 m<sup>3</sup>/s.

Les caractéristiques des crues observées depuis 1903, données dans les annexes du volume No 3 sont à considérer avec une certaine réserve puisque les mesures effectuées quotidiennement, à heure fixe, ne captent pas forcément l'amplitude maximum et qu'elle requièrent une extrapolation des barèmes de tarage.

L'examen des hydrogrammes des crues observées simultanément aux stations les plus importantes du Sénégal et de ses affluents fait apparaître une similitude des hydrogrammes de la Falémé et du Bafing. De même la superposition de l'ensemble des hydrogrammes des 3 affluents principaux recouvre relativement bien celui du Sénégal à Bakel.

Les caractéristiques des crues exceptionnelles et en particulier celles de la crue millénaire ayant servi au dimensionnement des évacuateurs de crues, ont été obtenues également par la méthode de Gauss.

Une périodicité dans la succession des débits annuels ne semble pas pouvoir être mise statistiquement en évidence bien que quelques groupements d'années sèches et d'années humides puissent être constatés. En effet, une succession d'années hydrauliquement riches a été observée durant les 40 dernières années avec une fréquence de 10 à 12 ans, alors que les années sèches sont apparues tous les 25 à 30 ans environ.

En appliquant le module mouvant de cinq années, les fleuves Sénégal, Niger et Nil ont été comparés (voir annexe 1.11). On constate que la période d'environ 30 années mentionnée ci-dessus peut être observée au Niger également tandis que le Nil semble avoir d'autres caractéristiques.

La MAS a mis en place un dispositif de prévision des crues qui devrait permettre aux riverains, aux agriculteurs et aux navigateurs de prendre les mesures nécessaires en temps utile. Il s'avère cependant particulièrement hasardeux de tirer des conclusions statistiques trop hâtives des résultats de mesures recueillis à ce jour, étant donné que le nombre d'années d'observation reste encore relativement limité. Rien n'empêche cependant de perfectionner d'année en année le dispositif mis en place en réajustant chaque fois les prévisions aux observations réellement effectuées. En complément de l'étude de la MAS, SENEGAL-CONSULT a effectué une analyse comparative des crues mesurées dans la partie haute du bassin versant et des crues mesurées à Bakel pour obtenir un moyen permettant la prévision des crues à court terme. Le but principal de cette analyse était de trouver un décalage de temps bien déterminé et le plus grand possible entre les mesures faites dans la partie haute et la partie basse du bassin versant. La meilleure corrélation a été trouvée entre le total des débits des crues mesurées simultanément à Dibia, Oualia et Fadougou et les crues mesurées à Bakel. Le résultat est présenté dans l'annexe 1.13. Il en ressort que pour les hautes crues on peut observer un décalage constant de temps de 16 jours entre les mesures à Dibia, Oualia et Fadougou et l'arrivée de la crue à Bakel. Les débits maximums à Bakel peuvent ainsi être calculés approximativement selon la formule suivante :

$$Q_{\text{Bakel}} = 2,63 \times (Q_{\text{Dibia}} + Q_{\text{Oualia}} + Q_{\text{Fadougou}}) - 1450$$

(16 jours plus tard)

Les débits étant exprimés en m<sup>3</sup>/s.

### 3.7. Morphologie du fleuve

Un élément important dans l'établissement d'un projet de retenue peut être constitué par le volume d'apport solide que transitent les eaux du fleuve aménagé. Aussi, des mesures de transport solide en suspension et par charriage sur le fond sont-elles souvent entreprises afin de procéder à une évaluation de la masse des transports solides.

Pour le Sénégal, seules des mesures de transport en suspension ont été effectuées, le charriage sur le fond étant considéré comme n'ayant pas d'influence prépondérante sur la morphologie du lit. Il s'avère que la concentration des sédiments atteint son maximum au début de la crue (avec une valeur de l'ordre de 300 gr par m<sup>3</sup>). La grandeur des particules en suspension est très faible et semble ainsi ne pas être en rapport avec la morphologie même du lit.

Le résultat des mesures antérieures, corroboré par ceux des mesures de SENEGAL-CONSULT, permet d'affirmer que la quantité annuelle moyenne des apports solides dans le Sénégal à Kayes ne dépassera pas 2 à 3 millions de tonnes. Le volume correspondant à ce tonnage ne représente qu'une infime partie de la capacité des retenues projetées.

Il ne semble pas non plus que les modifications du régime hydraulique qui interviendront après la construction des aménagements puissent influencer sensiblement la morphologie du fleuve et de ses affluents et engendrer une augmentation sensible du volume charrié sur le fond.

### 3.8. Végétation et déboisement

La végétation dans l'emprise des bassins d'accumulation de Manantali, Galougo et Gourbassi diffère assez peu d'un bassin à l'autre. Partout on rencontre la savane avec des arbres de 10 à 15 m de haut dont la densité est très variable. Ces bouquets d'arbres, assez dense près des cours d'eau sont clairsemés sur les hauteurs. Comme arbres, on trouve le karité (arbre à beurre), le néré, le tamarinier, des baobabs, différentes espèces d'acacias et des bambous, ces derniers plus particulièrement dans la vallée de la Falémé.

La surface des bassins, cités ci-dessus varie entre 500 et 1 800 km<sup>2</sup>. Il serait impensable de déboiser mécaniquement ou manuellement de telles surfaces parce que trop onéreux. Dans les grands bassins créés au Katanga (Congo-Kinshasa) et celui de Cariba (Rhodésie), le déboisement a été fait par le feu. En effet, par ce moyen on arrive à brûler les grandes herbes de la savane et à calciner les arbres. Ce travail peut être exécuté par la population locale qui peut surveiller et diriger la progression du feu par l'établissement de coupe-feu.

## Chapitre 4

### BASES DE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES

## 4. BASES DE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES

---

### 4.1. Généralités

---

Une étude de l'ampleur de celle qui fait l'objet du présent rapport exige la mise au point préalable d'un certain nombre d'options de base tant techniques qu'économiques. Il s'agit en effet de comparer entre elles diverses possibilités d'aménagement et il est indispensable que chacune des variantes soit conçue selon des critères identiques. Il est donc nécessaire, avant de procéder à la définition des caractéristiques des différents ouvrages, de fixer d'une manière rigoureuse les critères à appliquer pour le dimensionnement de ceux-ci. Une telle définition présente obligatoirement un certain caractère tant soit peu arbitraire. Il est évident qu'une certaine souplesse dans l'utilisation des critères permettrait parfois d'imaginer des solutions plus séduisantes et plus économiques. Il importe toutefois de ne pas perdre de vue le but de l'étude qui consiste à rechercher la solution optimale parmi un très grand nombre de variantes possibles. La validité d'une telle analyse n'est effective que dans l'hypothèse d'une similitude rigoureuse des bases de dimensionnement. Il sera en revanche souhaitable et même indispensable de réviser fondamentalement certains critères lors de la mise au point des caractéristiques définitives de la solution retenue. Cette manière de faire permettra d'adapter mieux encore les dimensions de l'aménagement retenu aux objectifs spécifiques auxquels devra tendre ce dernier.

Il convient de relever d'ailleurs qu'une modification des critères de dimensionnement pour autant qu'elle concerne toutes les solutions, n'est pas à même d'entraîner un bouleversement complet de l'ordre des valeurs des diverses solutions. Les tests de sensibilité auxquels le modèle mathématique utilisé pour l'analyse comparée des diverses variantes a été soumis, ont démontré en effet le peu d'influence d'une modification même importante dans les bases de dimensionnement choisies. Il a été constaté en particulier que l'ordre des valeurs des solutions était pratiquement indépendant des prix unitaires choisis pour le calcul des coûts relatifs des différents ouvrages, pour autant évidemment que ces prix unitaires soient appliqués à toutes les solutions.

Les bases de dimensionnement sont de plusieurs natures, il s'agit tout d'abord des critères techniques utilisés pour le dimensionnement des différents ouvrages, il s'agit ensuite des critères économiques. Ceux-ci s'appliquent d'une part lors de la détermination des coûts des diverses variantes et d'autre part pour l'estimation des frais annuels d'exploitation, d'entretien et d'amortissement.

## 4.2. Bases techniques

### 4.2.1. Principes généraux

Chacun des sites de barrage reconnu sur la base de caractéristiques topographiques favorables au cours des premières prospections a fait l'objet d'un examen critique de ses autres aspects. Il convenait en effet d'éliminer le plus rapidement possible les emplacements où la réalisation d'un ouvrage se serait, pour des raisons techniques, révélée très difficiles. Actuellement la notion d'impossibilité sur le plan technique tend en effet à disparaître en raison des moyens toujours plus perfectionnés que la science moderne met à la disposition des ingénieurs. C'est pourquoi il est souvent imprudent d'écarter d'emblée certaines solutions sans avoir procédé au moins à une analyse préalable sommaire de leur coût d'exécution. L'élimination d'un site n'a été décidée dans le cas de l'étude du bassin du Haut Sénégal que lorsqu'il existait une possibilité de remplacement plus intéressante et qui aurait été exclue par le choix du premier site.

Il n'est pas possible d'accroître indéfiniment la taille d'un ouvrage de retenue. Les dimensions de ce dernier sont dans les cas les plus favorables limitées par les contraintes dans l'ouvrage ou sur la fondation. Dans la majorité des cas cependant, la taille limite d'un ouvrage dépend des conditions topographiques et morphologiques du site. En effet, en cas de dépassement d'une certaine cote elles impliquent un allongement considérable du couronnement du barrage ou la construction d'ouvrages secondaires coûteux. Dans d'autres cas, la surface de la retenue croît d'une manière telle qu'en raison de l'influence de l'évaporation à la surface du plan d'eau, l'effet régularisateur de la retenue diminue avec l'accroissement du volume accumulé.

La capacité des bassins d'accumulation envisageables dans le bassin du Haut Sénégal est limitée physiquement très *en-deça* au-delà des valeurs maximums que les apports naturels aux différents sites permettraient de choisir. En effet, la régularisation totale du fleuve Sénégal à Bakel à la valeur de son débit moyen inter-annuel nécessite la création de retenues d'une capacité totale de 70 à 80 milliards de m<sup>3</sup>. Les conditions géologiques et topographiques permettraient techniquement et physiquement la réalisation d'une telle accumulation au moyen du seul et unique barrage à Galougo par exemple. La rentabilité d'un tel aménagement serait cependant inférieure à celle de la combinaison des différentes retenues en raison principalement de la plus faible productibilité énergétique d'un seul aménagement.

Il n'est donc pas nécessaire, dans le cas des bassins d'accumulation réalisables dans le Haut du Sénégal, d'en définir les limites physiques car toutes les variantes envisagées sont en-deçà de ces dernières.

#### 4.2.2. Bases de dimensionnement des barrages

La détermination du type de l'ouvrage de retenue le mieux adapté à un site donné dépend d'un grand nombre de facteurs. Parmi les plus importants, il faut retenir la topographie du site, les caractéristiques géologiques et géotechniques du sol, les matériaux de construction disponibles et l'économie du projet. Ce dernier facteur est influencé d'autre part, plus ou moins fortement par la proximité ou l'éloignement des zones d'emprunt des matériaux nécessaires à la construction de l'ouvrage, ainsi que par l'importance de la distance séparant le site des centres de ravitaillement pour les matériaux de construction. L'économie du projet est également influencée par l'importance des débits de crue à évacuer pendant la construction de l'ouvrage d'une part et durant l'exploitation d'autre part. Les débits de crues définissent en effet le choix du mode de dérivation des eaux pendant la construction ainsi que les dimensions et le type des évacuateurs de crues.

Dans le cadre de l'étude des sites de barrage réalisables dans le bassin du fleuve Sénégal, un premier choix a été dicté par les conditions topographiques. La forme des vallées éliminait en effet d'emblée la solution d'un barrage-voûte mais permettait d'envisager soit la réalisation d'un ouvrage en béton type barrage-poids ou à voûtes multiples soit une digue en terre ou en enrochements soit encore la combinaison de ces différents types d'ouvrage.

L'étude de la géologie de surface à chacun des emplacements ainsi que les résultats des prospections géophysiques ou par sondages ont permis ensuite de préciser davantage le choix du type d'ouvrage susceptible d'être réalisé. Il a été ainsi possible, dans certains cas d'écarter d'emblée des solutions prévoyant un ouvrage uniquement en béton en raison de la mauvaise qualité du terrain de fondation. Dans d'autres cas, en revanche, ces prospections ont montré que les conditions géologiques ne réduisaient pas le nombre des solutions envisageables sur la base des conditions topographiques.

La recherche des zones d'emprunt des matériaux nécessaires à la construction des ouvrages et les essais géotechniques effectués en laboratoire par les soins de SENEGAL-CONSULT sur des échantillons prélevés dans ces zones, ont permis ensuite de réduire dans certains cas le nombre des solutions techniquement envisageables. En effet, par exemple, l'absence totale de matériaux imperméables à proximité du site élimine les solutions prévoyant une digue avec noyau central.

Sur la base des données et renseignements fournis par la topographie du site, sa géologie et les caractéristiques géotechniques des matériaux de construction, il a été possible dans une première phase d'établir pour les divers sites envisagés un avant-projet sommaire pour chacun des types d'ouvrage de retenue techniquement réalisables. Au cours de l'établissement de ces avant-projets, il est apparu que l'importance des débits des rivières à évacuer durant la construction était telle, principalement durant la période des crues, qu'elle excluait pour des raisons économiques, la construction de galeries de dérivation. C'est la raison pour laquelle SENEGAL-CONSULT a estimé nécessaire d'envisager à chacun des sites de retenue une partie d'ouvrage en béton, susceptible d'être submergée sans dommage lors du passage des crues pendant la construction.

Pour chacun des sites, un devis estimatif sommaire a été établi pour chaque type d'ouvrage envisagé, de manière à permettre la comparaison entre elles des diverses solutions sur des bases économiques identiques. Il n'est cependant pas évident que si un type de barrage s'avère plus économique qu'un autre pour une hauteur donnée, ce fait se vérifie également pour un ouvrage d'autres dimensions. C'est pourquoi la comparaison économique des différents types d'ouvrage possibles a été faite pour différentes hauteurs de barrage. Les résultats de cette comparaison ont été présentés dans les Rapports Intérimaires que SENEGAL-CONSULT a remis aux Nations Unies en décembre 1968 et août 1969.

Pour le dimensionnement des ouvrages de retenue, il a été tenu compte des hypothèses de base suivantes :

- Les fondations d'un barrage en béton comme celles du noyau ou du masque amont d'une digue doivent s'enfoncer de 2 à 3 m dans le rocher sain. En revanche, les corps d'appui amont et aval d'une digue peuvent reposer sur des matériaux meubles ou sur de la roche altérée pour autant que les caractéristiques de ces matériaux le permettent.
- Les organes de dérivation provisoire, pendant la construction, ont été dimensionnés pour permettre le passage d'une crue d'un débit correspondant à une période de récurrence de l'ordre de 20 ans.
- La revanche au-dessus du niveau maximum atteint lors de la crue millénaire a été fixée à 2 m dans le cas d'un barrage en béton et à 3 m dans celui d'une digue en terre ou en enrochements.
- Le niveau maximum atteint lors d'une crue exceptionnelle est défini dans chaque cas en fonction de l'hydrogramme de la crue entrant dans la retenue, des dimensions de cette dernière et des caractéristiques de l'évacuateur de crues envisagé.

- Chaque ouvrage de retenue est complété par un rideau d'injections dont les caractéristiques ont été estimées sur la base des résultats des prospections géologiques. Un voile de drainage est également prévu en aval du rideau principal d'injections et des injections de consolidation et de contact seront réalisées aussi bien sous la partie d'ouvrage en béton que sous le noyau des digues ou au pied du masque amont d'étanchéité.
- Une route de 6 m de largeur est prévue sur le couronnement de chacun des ouvrages. La largeur totale du couronnement est de 10 m dans le cas des digues en terre ou en enrochements et de 6 m sur les parties d'ouvrage réalisées en béton.

#### 4.2.3. Bases de dimensionnement des ouvrages annexes

De manière à pouvoir comparer, d'une part les différentes solutions envisageables à un même site entre elles et d'autre part les différents sites entre eux, les ouvrages annexes, c'est-à-dire évacuateur de crues et vidange de fond, ont été dimensionnés sur des bases identiques.

Les organes d'évacuation des crues des ouvrages de retenue envisagés ont été, dans la première phase des études, dimensionnés de manière à pouvoir évacuer au maximum les 60 % du débit de pointe de la crue millénaire définie pour le site de barrage considéré. Cette condition doit être remplie, si l'évacuateur de crues est équipé de vannes, pour le cas où la plus grande vanne reste accidentellement bloquée en position fermée lors du passage d'une crue. Ce laminage était rendu possible par l'accumulation au-dessus du niveau de retenue normale d'un volume correspondant à un apport égal aux 40 % du débit de pointe de la crue millénaire durant 6 jours. Dans la seconde phase des études, après que les caractéristiques optimums des bassins d'accumulation aient été définies, les évacuateurs de crue des ouvrages retenus ont fait l'objet d'une étude plus précise, basée sur les hydrogrammes des crues déterminés à chaque site. Un des objectifs à atteindre par la réalisation de bassins d'accumulation sur le fleuve Sénégal et ses affluents consiste à protéger la vallée basse en aval des barrages, contre les inondations catastrophiques. C'est la raison pour laquelle Les Nations Unies avaient prescrit à SENEGAL-CONSULT d'écrêter suffisamment les crues dans les ouvrages de retenue pour que, lors d'une crue de fréquence centenaire, le débit maximum à Bakel ne dépasse pas, après la réalisation des ouvrages de régularisation, le débit enregistré actuellement lors d'une crue décennale. Cette condition ne peut être réalisée avec l'aménagement de Gourbassi seul, qui ne peut contrôler que les crues de la Falémé. En revanche, les organes d'évacuation des crues des ouvrages de retenue de Galougo et de Manantali ont été dimensionnés de manière à remplir cette condition.

Les organes de vidange de fond ont été dimensionnés de manière à permettre le passage sous la chute minimum d'exploitation d'un débit correspondant au débit équipé de l'usine hydro-électrique. Cette condition permet d'assurer la dotation du cours d'eau en aval de l'usine même si l'exploitation de cette dernière est totalement interrompue.

#### 4.2.4. Bases de dimensionnement des centrales hydro-électriques

L'idée générale qui a présidé au choix des caractéristiques des centrales hydro-électriques prévues dans cette étude consistait à assurer une production d'énergie de base garantie au moins 8 000 heures par an.

De manière à permettre une comparaison valable des divers aménagements envisagés, la puissance installée de chacune des centrales hydro-électriques a été admise égale à  $1,5 \times$  la puissance garantie. En dépit de son caractère arbitraire, cette hypothèse permet de tirer des conclusions valables de la comparaison. En effet, le choix d'une puissance installée plus faible ou plus forte ne pourrait modifier l'ordre de valeur des différentes solutions car la production d'énergie de chacune d'elles n'est que très faiblement influencée par la puissance installée.

Les aménagements hydro-électriques envisagés dans le cadre de l'étude réalisée par SENEGAL-CONSULT peuvent être classés dans trois catégories différentes à savoir :

- aménagement à accumulation dont le but principal est la régularisation du fleuve en aval
- aménagement à accumulation dont le but est la production d'énergie
- aménagement au fil de l'eau destiné à la production d'énergie.

Les bassins d'accumulation réalisés en vue de la régularisation des débits du fleuve Sénégal sont conçus de manière à assurer à Bakel l'écoulement d'un débit plus ou moins constant tout au long de l'année. Compte tenu de cette sujétion l'équipement de l'usine hydro-électrique située au pied du barrage a été dimensionné de manière à permettre la production d'énergie à la puissance constante la plus élevée possible. Cette puissance, nommée puissance garantie, doit être disponible 8000 heures par an et au moins 9 années sur 10. Les équipements des usines ont été prévus pour fournir sous la chute moyenne d'exploitation une puissance égale à  $1,5 \times$  la puissance garantie.

Les aménagement à accumulation destinés essentiellement à la production d'énergie comprennent les bassins d'accumulation dont la capacité était insuffisante pour leur permettre de jouer un rôle important dans la régularisation du fleuve Sénégal. Ces aménagements sont situés pour la plupart sur le cours supérieur des divers affluents du fleuve Sénégal. Ces retenues ont été dimensionnées de manière à assurer une production d'énergie répartie uniformément sur 8 000 h par année en année moyenne. Les équipements électromécaniques des usines sont dimensionnés dans ce cas comme dans le précédent de manière à assurer sous la chute d'exploitation moyenne une puissance égale à 1,5 x la puissance garantie.

Les aménagement au fil de l'eau tels que Felou et Petit Gouina sont en général des aménagement à faible chute qui sont dimensionnés de manière à pouvoir produire sous la chute d'exploitation moyenne une puissance égale à 1,5 x la puissance garantie pendant 8000 heures et 9 années sur 10. Un dimensionnement tenant compte de la chute minimum conduirait dans le cas particulier des aménagements au fil de l'eau à un surdimensionnement inutile compte tenu du supplément de production d'énergie qu'il serait possible de réaliser.

Les principes de dimensionnement exposés ci-dessus permettent diverses possibilités d'exploitation des aménagements hydro-électriques. Il permettent en particulier :

- d'assurer la puissance garantie quelque soit le niveau amont grâce à la possibilité de turbinage d'un débit plus important que le débit de régularisation
- d'assurer une réserve en cas de revision ou de panne d'une des turbines donnant ainsi la possibilité de garantir la production d'énergie envisagée
- de donner la possibilité de fournir des pointes d'énergie durant certaines heures si la demande le justifie
- d'assurer la production d'énergie secondaire à certaines époques de l'année.

Le nombre des groupes équipant chacune des centrales hydro-électriques a été déterminé en fonction des critères suivants :

- éventuelle réalisation par étapes de l'équipement électromécanique des usines
- possibilité de transport des pièces les plus lourdes et les plus encombrantes par les voies ferrées existantes et les voies d'accès à chacun des sites

### 4.3. Bases économiques de dimensionnement

#### 4.3.1. Prix unitaires pour les travaux de génie civil

##### 4.3.1.1. Gros oeuvre

Une estimation correcte des prix unitaires de travaux se heurte, même dans des pays où le marché du génie civil est bien développé, à de grosses difficultés. Il n'est pas rare en effet que lors d'un appel d'offres les prix proposés par les divers soumissionnaires d'une part diffèrent sensiblement du montant estimé et d'autre part présentent entre eux des différences encore plus importantes. En outre, pour des travaux du même genre, exécutés dans des conditions similaires, les coûts de construction sont très souvent différents ceci en raison de la situation du marché en général lors de l'appel d'offres, des disponibilités en matériel des entreprises, et du jeu de la concurrence.

Dans des pays tels que ceux où des aménagements destinés à la régularisation du fleuve Sénégal sont envisagés, l'estimation des coûts de travaux du génie civil est encore plus délicate. En effet, il n'existe que peu de points de comparaison car les travaux de génie civil importants réalisés récemment dans cette région de l'Afrique sont rares. On constate en outre généralement que lors des appels d'offres pour des travaux d'outre-mer, les soumissions présentent entre elles des différences encore plus importantes que pour des travaux en Europe.

Dans ces conditions, il a semblé illusoire de chercher à définir les prix unitaires des travaux du génie civil sur la base de ceux pratiqués dans des pays voisins pour des ouvrages de l'importance de ceux prévus par le projet d'aménagement du haut-bassin du fleuve Sénégal. En effet, les points de comparaison sont très rares et concernent en outre des ouvrages réalisés à des périodes différentes et dans des pays différents. Il a paru plus judicieux de baser le calcul des coûts de construction sur les prix unitaires pratiqués en Europe et en particulier en Suisse en adaptant ces derniers aux conditions locales par l'introduction de différents coefficients de correction.

Chaque prix unitaire peut être décomposé en deux parties. La première, appelée "prix sec", résulte de la somme de trois composants principaux qui sont : le coût de la main-d'oeuvre, celui des matériaux et ceux de l'exploitation et l'entretien des machines de chantier. La seconde est estimée en pourcent de la première. Elle couvre d'une part, la mise à disposition des installations de chantier et des engins de construction qui

comprend aussi bien l'aménée sur place et le replis que l'amortissement du matériel, et est en général proportionnelle au prix sec. D'autre part, les frais généraux de l'entreprise, risques et bénéfices sont calculés également en majorant le prix sec par un certain coefficient.

Une analyse des prix unitaires pratiqués sur de nombreux chantiers européens a permis de procéder à une décomposition de ceux-ci. Sur la base des critères exposés ci-dessus, en règle générale, la majoration pour frais généraux, risques et bénéfices s'élève en Suisse à 18 % et en moyenne les prix secs sont majorés de 36 % pour la mise à disposition des installations de chantier. La décomposition des prix secs principaux en main-d'oeuvre, matériaux et exploitation et entretien des installations de chantier est indiquée ci-dessous pour différentes catégories de travaux.

Décomposition des prix secs en %

	Main d'oeuvre	Matériaux	Exploitation et entretien du matériel
<u>- Excavations</u>			
1. Excavations en terrain meuble	20	-	80
2. Excavations en rocher	25	15	60
<u>- Remblais</u>			
3. Remblais en matériaux meubles	15	-	85
4. Remblais en enrochements	20	10	70
5. Remblais pour noyaux	20	-	80
6. Remblais pour filtres	25	-	75
<u>- Ouvrages en béton et injections</u>			
7. Béton de masse CP 250 pour barrages	15	68	17
8. Béton CP 300 pour ouvrages annexes en béton ou béton armé	20	66	14
9. Masque étanche en béton armé	25	60	15

	Main d'oeuvre	Matériaux	Exploitation et entretien du matériel
10. Armatures pour béton armé	15	80	5
11. Coffrages plans métalliques pour barrages	65	25	10
12. Coffrages en bois pour ouvrages annexes	65	25	10
13. Injections	20	50	30

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- Le poste "matériaux" comprend l'achat, le transport, la manutention, le stockage et les pertes de tous les matériaux entrant dans l'ouvrage ou de ceux, tels que les explosifs, nécessaires à l'exécution des travaux.
- Le poste "Exploitation et entretien du matériel" comprend les carburants ou l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des engins, les frais d'entretien et de réparation ainsi que les pièces de rechanges. L'amortissement, le transport et la mise en place des installations de chantier sont compris en revanche dans la majoration des prix secs.

L'analyse des prix de construction pratiqués outre-mer et l'étude des conditions locales ont permis de définir l'importance des coefficients d'adaptation à appliquer aux différentes composantes des prix unitaires pour tenir compte des conditions d'exécution en Afrique par rapport à celles existant en Suisse. Ces coefficients d'adaptation ont été définis de la manière suivante :

- A. Main d'oeuvre

Il a été admis que la main-d'oeuvre utilisée sur les chantiers sera composée de 70 % d'ouvriers indigènes et de 30 % d'ouvriers européens. Les salaires des ouvriers africains sont ceux en vigueur en 1969 dans les différents pays intéressés et les salaires de la main-d'oeuvre européenne travaillant en Afrique ont été admis égal au double de ceux pratiqués en Suisse pour tenir compte des indemnités et des frais de déplacement. Le prix moyen de l'heure d'ouvrier a été établi en tenant compte des différences de rendements des deux catégories de main-d'oeuvre par rapport à l'Europe. En effet, il faut admettre que le rendement de la main-d'oeuvre européenne en



Afrique sera inférieur au rendement en Europe. En raison de la différence du coût de la main-d'oeuvre indigène entre le Mali d'une part et le Sénégal et la Guinée d'autre part, on obtient deux prix moyens de l'heure d'ouvrier. Toutefois, l'influence de cette différence reste inférieure à 10% du prix sec de sorte qu'il n'a pas été jugé nécessaire d'en tenir compte. Il a été ainsi admis que, compte tenu des différences de rendement et des salaires des 2 catégories de main-d'oeuvre, le coût moyen de l'heure d'ouvrier en Afrique était 20 % inférieur au coût moyen de l'heure d'ouvrier en Suisse.

#### - B. Exploitation et entretien des installations de chantier

Ces frais sont plus élevés en Afrique car les transports renchérissent le coût des carburants et des pièces de rechange.

En outre, il est nécessaire de disposer sur le chantier d'un stock de pièces de rechange plus important qu'en Europe où l'approvisionnement ne pose pas de problèmes. D'autre part, la main-d'oeuvre qualifiée chargée de l'entretien des machines de chantier est essentiellement européenne et coûte plus cher qu'en Europe. Sur la base de l'expérience acquise sur les chantiers d'outre-mer, les frais d'exploitation et d'entretien des installations de chantier sont 30 % environ plus élevés en Afrique qu'en Europe et en particulier en Suisse.

#### - C. Matériaux de construction

Pour la détermination du coût franco chantier des principaux matériaux de construction utilisés, il a été tenu compte des prix pratiqués à Dakar et du coût de transports jusqu'aux différents sites de barrages. En effet, il n'existe pratiquement pas d'autre centre de ravitaillement pour les ouvrages prévus dans le bassin du Haut-Sénégal. En ce qui concerne les ouvrages de retenue situés en Guinée et pour lesquels les matériaux de construction proviendront de Conakry, il a été admis en première approximation qu'il n'y aurait pas de différence de prix. En effet, il s'agit principalement de matériaux de construction importés pour lesquels il a été admis une exemption des droits de douane en raison du caractère d'utilité publique des constructions envisagées. Une cimenterie a été mise en service au Mali mais sa capacité de production sera vraisemblablement trop faible pour alimenter les chantiers. D'autre part le prix du ciment qui y est produit, correspond à celui du ciment transporté depuis Dakar. Les frais de transports entre Dakar et les différents sites de barrage sont variables. Toutefois cette différence n'est sensible que pour le prix du ciment franco chantier et peut être négligée pour les autres matériaux de construction. Les prix franco chantier indiqués ci-dessous pour les différents matériaux de construction tiennent compte des frais de stockage et de manutention,

ainsi que d'une augmentation par rapport à l'Europe des pertes lors des transbordements.

Prix franco chantier des principaux matériaux de construction

	Prix en Afrique	Augmentation par rap- port à la Suisse
a) Ciment :		
Site de Galougo	51.5 \$/t	+ 160 %
Badoumbé	53.8 \$/t	+ 171 %
Maréla et Boudofora	56.1 \$/t	+ 182 %
Manantali et Koukoutamba	58.4 \$/t	+ 194 %
Gourbassi	60.7 \$/t	+ 206 %
Boureya, Bindougou et Moussala	63.1 \$/t	+ 218 %
b) Fers d'armature	210 \$/t	+ 20 %
c) Bois de construction	120 \$/m <sup>3</sup>	+ 90 %
d) Explosifs (nitrate d'ammonium)	630 \$/t	- 10 %

- D. Mise en place, repli et amortissement des installations de chantier

Comme il l'a été mentionné plus haut, les prix secs sont majorés en Suisse de 36 % pour la couverture des frais d'amenée, de mise en place et de repli des installations de chantier et de leur amortissement pendant la durée des travaux. Ces installations de chantier comprennent aussi bien les machines et les engins nécessaires à la construction proprement dite que les cantonnements de la main-d'oeuvre et les routes à l'intérieur du chantier. Il a été admis, sur la base des expériences réalisées sur de nombreux chantiers outre-mer, que les transports aller et retour, les assurances, les frais supplémentaires de la mise en place des installations dus au coût plus élevé de la main-d'oeuvre spécialisée occasionneraient une majoration

d'environ 20 % du coût total des installations. En outre, il est indispensable sur un chantier outre-mer de disposer sur place d'une réserve suffisante permettant d'accroître en cas de besoin la capacité de production ou de remplacer rapidement une installation défectueuse ou tombée en panne. C'est la raison pour laquelle les installations de chantier pour la construction d'ouvrages importants outre-mer sont surdimensionnées. Le suréquipement par rapport à des chantiers semblables en Suisse est de l'ordre de 20 %. Dans ces conditions, les prix secs en Afrique doivent être majorés de 50 % pour la couverture des frais occasionnés par l'amenée, l'installation, l'amortissement et le repli du matériel de chantier.

- E. Frais généraux, risques et bénéfices

En Suisse, ce poste représente en moyenne 18 % du prix sec. Pour les travaux outre-mer, les frais généraux sont plus élevés en raison de la distance séparant le chantier du siège de l'entreprise et en règle générale, les risques courus sont plus importants. C'est la raison pour laquelle la majoration pour frais généraux, risques et bénéfices atteint en moyenne 29 % du prix sec.

Les prix unitaires de travaux pour les ouvrages envisagés dans le bassin du Haut Sénégal ont ainsi été calculés sur la base des prix d'ordre pratiqués en Suisse à l'aide des divers coefficients d'adaptation mentionnés ci-dessus. Le tableau ci-après indique les prix unitaires qui ont été appliqués pour l'établissement des différents devis et donne à titre indicatif le prix d'ordre pour des travaux du même genre pratiqués en Suisse.

Prix unitaires utilisés

	Unité	Prix en Afrique \$	Prix en Suisse \$
<u>Terrassements</u>			
- Excavation en terrain meuble avec gros engins	m <sup>3</sup>	1.05	(0.70)
- Excavation en rocher à ciel ouvert et en grande masse	m <sup>3</sup>	3.05	(2.30)
- Remblais en matériaux tout-venant, y compris extraction, transport sur 1,5 km, mise en place et compactage	m <sup>3</sup>	2.20	(1.55)
- Remblais en enrochements de carrière y compris extraction, transport sur 1,5 km mise en place et compactage	m <sup>3</sup>	3.75	(2.70)
- Remblais pour noyau de digue, y.c. extraction, triage, transport, mise en place et compactage	m <sup>3</sup>	2.90	(2.05)
- Remblais pour couches de transition et rip-rap y compris extraction, tirage, transport et mise en place	m <sup>3</sup>	4.45	(3.10)
<u>Bétons</u>			
- Armatures pour béton armé	t	380.-	(280.--)
- Coffrages métalliques	m <sup>2</sup>	4.70	(3.40)
- Coffrages bois pour surface courbe en évidements	m <sup>2</sup>	9.40	(6.85)

Béton et injections

Prix en \$ par unité pour chaque site de barrage

	Béton de masse CP. 250 pour barrage m3	Béton CP. 300 pour ouvrages en béton armé m3	Masque en béton pour digue m3	Voile d'in- jections m2
Galougo	29.5	41.0	70.0	13.0
Badoumbé	30.0	41.5	71.5	13.0
Maréla Boudofora	30.5	42.5	73.0	13.5
Manantali Koukoutamba	31.5	43.5	74.5	14.0
Gourbassi	33.0	44.5	76.0	14.5
Boureya Bindougou Moussala	34.5	46.0	78.0	15.0
Suisse	(13.60)	(20.-)	(36.-)	( 6.-)

Le coût de construction de la superstructure des bâtiments, c'est-à-dire les usines hydro-électriques et les bâtiments de service et de commande a été calculé sur la base d'un prix au m<sup>3</sup> construit de 50 \$<sub>f</sub>. Ce prix correspond au coût d'usines hydro-électriques réalisées récemment en Afrique et s'applique au volume de bâtiment situé au-dessus du plancher du sous-sol le plus profond.

On constate que les prix unitaires définis de cette manière sont sensiblement supérieurs à ceux pratiqués en Suisse. Toutefois, ils sont inférieurs à ceux qui ont fait l'objet du marché de travaux relatif à la construction du barrage de Kossou sur le fleuve Bandama en Côte d'Ivoire. Les prix unitaires pratiqués sur ce chantier ont fait l'objet d'une analyse détaillée de la part des services de l'OERS dont les résultats ont été communiqués à Sénégal-Consult en avril 1970. Le barrage de Kossou présente des caractéristiques assez voisines de celles du barrage de Galougo de sorte qu'il est possible de comparer entre eux les prix unitaires principaux. Cette comparaison fait apparaître les différences suivantes:

	Prix unitaires		différence en %
	Galougo	Kossou	
- Excavation en terrain meuble \$/m <sup>3</sup>	1.05	2.53	+ 140 %
- Excavation en rocher \$/m <sup>3</sup>	3.05	4.93	+ 61 %
- Remblai en matériaux meubles \$/m <sup>3</sup>	2.20	3.58	+ 63 %
- Remblai en matériaux rocheux \$/m <sup>3</sup>	3.75	4.00	+ 7 %
- Remblai pour noyau \$/m <sup>3</sup>	2.90	4.03	+ 39 %
- Remblai pour filtre \$/m <sup>3</sup>	4.45	9.21	+ 107 %
- Béton de masse \$/m <sup>3</sup>	34.0*	57.62	+ 69 %
- Béton armé \$/m <sup>3</sup>	45.7*	107.82	+ 135 %
- Armatures \$/t	380	341	- 10 %

\* Compte tenu de 4,7 \$/m<sup>3</sup> pour le prix des coffrages qui sont inclus dans les prix unitaires de Kossou.

Il apparaît ainsi, qu'à l'exception des prix concernant les remblais

en matériaux rocheux et les armatures, tous les prix unitaires appliqués pour la construction du barrage de Kossou sont nettement plus élevés que ceux définis par SENEGAL-CONSULT.

Une telle différence est explicable car l'estimation des prix réalisée par SENEGAL-CONSULT sur la base de prix pratiqués en Suisse admet comme principe que seules les conditions d'exécution diffèrent entre l'Afrique et la Suisse. Il est évident que lors de l'établissement des prix d'un marché de travaux, l'entrepreneur est contraint de tenir compte d'autres facteurs non négligeables. Il s'agit en particulier de facteurs économique-politiques tels que les conditions de financement, de fiscalité ou de stabilité monétaire par exemple. En outre, des prescriptions concernant l'importance des paiements en monnaie locale influencent fortement la formation des prix comme d'ailleurs la réputation de l'organisme chargé éventuellement d'assurer le financement. Il ne faut pas négliger non plus l'importance du jeu de la concurrence dans le calcul du montant d'une offre ni celui du prestige que retirera l'entrepreneur de l'adjudication d'un ouvrage spectaculaire.

Il convient dans cette optique de relever que dans le cas particulier du barrage de Kossou, l'entrepreneur adjudicataire assure le préfinancement partiel et s'était trouvé sans concurrence importante lors de la mise en soumission.

La non-représentativité des prix unitaires pratiqués au barrage de Kousso est mise en évidence par la comparaison avec les prix unitaires appliqués pour les constructions routières au Mali. En effet, et bien qu'il s'agisse de travaux d'un volume moins élevé et donc plus coûteux que dans le cas de construction de digues en terre, les prix d'excavation et de remblai correspondent à ceux estimés par SENEGAL-CONSULT. En outre, les prix de béton sont environ 30 % inférieurs aux prix unitaires admis pour la construction du barrage.

Dans ces conditions, SENEGAL-CONSULT a estimé que les prix unitaires définis par l'adaptation aux conditions locales pratiqués en Europe, devaient être considérés comme parfaitement valables pour l'étude d'optimisation réalisée dans le cadre du mandat qui lui était confié.

Toutefois et afin de démontrer l'importance des facteurs politico-économiques et d'une saine concurrence, les coûts de construction des ouvrages présentant des caractéristiques comparables à celles du barrage de Kossou, ont également été calculés sur la base des prix unitaires utilisés lors de la réalisation de cet ouvrage. Il s'agit uniquement de Galougo car à Manantali en particulier, l'ouvrage en béton envisagé n'est en aucune manière comparable à la digue de Kossou.

#### 4.3.1.2. <sup>(b)</sup> Routes et voie ferrée

En raison de l'absence de renseignements précis concernant la topographie, les caractéristiques géologiques et géotechniques des sols dans les régions où des routes devront être construites ou bien où le nouveau tracé de la voie de chemin de fer Dakar-Bamako sera placé, il n'a pas été possible de définir les prix unitaires pour les constructions routières et ferroviaires avec la même rigueur que les prix unitaires