

MODELE MATHEMATIQUE DU SENEGALAnalyse du rapport semestriel n° 3

## de la SOGREAH

Présentée par Marcel ROCHE à la réunion  
des 19 et 20 Janvier, à GRENOBLE

Première partie : Remarques courantes

Page 6 La SOGREAH insiste et insistera à nouveau plusieurs fois sur l'insuffisance des données topographiques ; elle considère que c'est un facteur limitant de la qualité du réglage. Il s'agirait de savoir au moins très approximativement dans quelle mesure des levés complémentaires pourraient permettre d'améliorer cette qualité.

On peut noter que dans son rapport semestriel n° 1, pages 8 et 9 (découpage du Sénégal et de son lit majeur), la SOGREAH, tout en signalant l'existence du décalage des systèmes de référence pour le nivelingement, ne semblait pas y attacher une grande importance.

Que signifie la phrase : "étant englobées dans des transversales de planimétrie, elles sont parfois obliques par rapport au sens de l'écoulement" ?

Page 7 - Préparation des données topographiques.

L'organisation du modèle en étages groupant un certain nombre de mailles n'est pas très bien expliquée. La Société devrait remettre aux experts le plan exact du découpage avec les caractéristiques topographiques des mailles.

- Les paramètres hydrauliques.

Les lois de déversoir sont-elles vraiment les seules à envisager pour le lit majeur ?

.../...

Page 8

- La description du programme de calcul est beaucoup trop sommaire. Il faudrait préciser la chaîne des opérations et le nombre de calculs unitaires (j'entends par là une résolution du système d'équations), ainsi que le mécanisme des calculs unitaires (avec loi de déversoir ou avec loi fluviale). Une telle description devrait être fournie aux experts et incluse dans le rapport final.

Le choix automatique du pas de temps de calcul devrait être mieux expliqué ; quelle est la nature des critères imposés au départ ? Comment le pas de temps peut-il valablement être inférieur à la journée alors que les données sont journalières ? Comment certaines valeurs du pas de temps peuvent-elles engendrer des oscillations dans le calcul ? Calcul itératif ?

On voudrait également avoir des détails sur ce programme qui permet de "corriger les données physiques du calcul" qui ne laisse pas de m'inquiéter quelque peu.

Page 9

- Il est parfaitement compréhensible que les données naturelles manquant en une année pour laquelle on désire simuler une crue soient évaluées d'une manière ou de l'autre (il s'agit bien sûr des données à infecter dans le modèle et non des valeurs observées destinées à permettre le contrôle du bon fonctionnement du modèle par comparaison avec les valeurs calculées). Je n'ai rien à dire sur la façon dont ces données ont été estimées pour les crues de 1964 et 1968 sinon que :
- le fait de déterminer les débits de la Kolimbiné par différence entre Kayes et Gouina ne constitue pas une information supplémentaire mais un palliatif, auquel d'ailleurs il est difficile de reprocher quelque chose puisqu'on ne peut pas faire autrement.
- le fait de déterminer les apports du Karakoro en utilisant le rapport de son bassin avec celui de la Kolimbiné n'a guère de signification hydrologique.

.../...

Il serait intéressant que la SOGREAH puisse nous dire, très grossièrement, quelle est l'incidence réelle des apports complémentaires sur le comportement d'une crue. Si en effet, comme je le pense, on est amené, au cours de l'utilisation du modèle, à faire de la simulation sur toute la période pour laquelle on possède des relevés de débits en tête de la Vallée, on sera bien obligé, pour la Kolimbinié, le Karakoro, les lacs Guiers et de R'Kiz, etc, pour l'évaporation également et la pluie, de se fixer un comportement annuel moyen. Cela ne présentera guère d'inconvénient si l'ensemble de ces phénomènes agit comme correctif, avec une influence faible par rapport au phénomène principal qui est évidemment le débit injecté en tête de Vallée. Si toutefois cette influence avait une certaine importance, il pourrait naître des divergences gênantes pour l'exploitation. Ceci pourrait être facilement vérifié en faisant, pour une ou deux années données, par exemple 1964 et 1968, varier arbitrairement le comportement de ces phénomènes, dans des limites vraisemblables bien sûr.

fin page 12 - S'il existe entre la Falémé et Diawara des accidents topographiques et début  
page 13      de nature à modifier le comportement de la crue à Bakel, pourquoi ne peut-on pas introduire directement dans le modèle la loi de variation de la surface en fonction de la hauteur de l'eau, comme on le fait par la suite, au lieu de procéder à un réglage paramétrique qui paraît assez laborieux.

A ce propos, et puisqu'on parle ici de la Falémé et des perturbations qu'elle risque d'introduire, il faudrait prévoir une version du modèle qui fonctionne à partir des débits et hauteurs à Bakel pour tous les aménagements à prévoir en aval de ce site. Un étalonnage très poussé de Bakel permettrait d'obtenir d'excellentes données d'entrées et on réglerait du même coup quelques problèmes ennuyeux du tronçon Gouina-Bakel. Ceci bien sûr dans l'optique de la non construction du barrage de Gouina.

.../...

On notera, en bas de la page 13, que les essais sur le tronçon amont sont très acceptables pour les crues de réglage.

- Page 14            - Je prends acte du fait que le réglage du modèle maillé ne peut être amélioré compte tenu de l'état actuel des connaissances sur les éléments naturels du Sénégal.
- Page 14            "... le travail s'effectue sur les deux crues de réglage". Dans le même passage ou en deux temps ?
- Page 15            - Le second alinéa est parfaitement incompréhensible.  
                  - Troisième alinéa : Par quoi sont définies les lois de débitance ?  
                  Par les coefficients de rugosité ?
- Page 16 et  
17            Il est tout-à-fait naturel que les débits obtenus par le calcul soient assez éloignés des débits mesurés, le réglage dépendant d'un critère basé sur les hauteurs. Il ne faut pas oublier que le modèle, dans ses éléments physiques, est une représentation très schématique de la réalité, qu'en dehors du découpage, forcément limité, les équations elles-mêmes ne correspondent pas exactement et dans le détail aux réalités de l'écoulement. Le choix du critère de réglage n'est donc pas sans influence sur les résultats mêmes de ce : réglage ; le critère ne peut être universel et satisfaire à tous les besoins ; dans le présent projet, il a été décidé de traduire ces besoins par une précision sur les niveaux qui seuls engagent la responsabilité contractuelle de la SOGREAH. De ce point de vue on peut dire que les obligations de cette Société sont satisfaites (Tableau de la page 17) pour le bief Bakel-Kaédi, si l'on considère l'esprit du contrat plutôt que sa lettre. Il ne faut pas oublier enfin que les éléments disponibles pour le contrôle (relevés de hauteurs) sont eux-mêmes sujets à des erreurs qui peuvent en certains cas égaler ou dépasser la tolérance consignée dans le contrat.

.../...

- Page 18     - A propos de Bakel, la SOGREAH évoque à nouveau le problème de l'altimétrie (voir commentaire sur page 6). Un autre problème soulevé est celui de l'imperfection de l'étalonnage (ici Kidira). Je suis d'accord qu'une défectuosité de l'étalonnage d'une station puisse créer des difficultés dans le réglage ; je ne suis pas d'accord que cette défectuosité puisse être corrigée par les résultats du modèle. Seules des campagnes supplémentaires abondantes et très sérieuses de mesures de débit peuvent améliorer la situation. La SOGREAH n'aurait pas dû modifier de son propre chef la loi hauteur débit à Kidira sous prétexte que les résultats du modèles s'en trouvent mieux.
- Page 26     - La SOGREAH évoque à nouveau le problème de Dagana. Il est certain qu'il y a là un mystère qui ne sera pas résolu par de simples débats en chambre. Il faudra bien un jour ou l'autre mettre les moyens qu'il faudra pour étalonner proprement cette station.
- Page 27     - Compte tenu des remarques déjà faites pour les autres tronçons, les résultats relatifs au tronçon encore plus complexe de l'île A MORPHIL peuvent être considérés comme satisfaisants en ce qui concerne les crues de réglage.
- Les exemples cités pages 27 et 28 sur les décalages d'éléments d'échelle entre eux ne sont certainement pas isolés ; de même, des variations de calage au cours du temps, souvent ignorées de tous, sont probables. Ces circonstances suffisent à justifier une certaine tolérance vis-à-vis des résultats du réglage. D'après ce qu'on sait de la précision des corrélations (plus ou moins cycliques) entre les relevés d'échelles différentes Guédé ne peut être prise en compte pour la définition de la précision du réglage en 1968.
- Page 30  
et 31     - Les explications concernant Dagana ne sont pas très convaincantes et font trop confiance aux possibilités du modèle. Le nombre de degrés de liberté est important dans ce genre de phénomène et les raisons fournies par la SOGREAH concernant le transit dans le lit mineur ne sont étayées par aucune observation objective. Il conviendrait, pour reprendre ce que j'ai déjà dit de considérer à nouveau le phénomène hydraulique à travers la sections de Dagana en mesurant avec soin les débits.  
.../...

Quant à la comparaison effectuée avec les jaugeages de Rosso, les résultats ne sont pas clairs non plus. On cite un écart moyen de 150 m<sup>3</sup>/s ; sur quoi ? S'il s'agit de débits de l'ordre de 3.000 m<sup>3</sup>/s l'erreur de 5% qui en découle n'est guère significative surtout si les méthodes de mesure utilisées à Dagana et à Rosso sont différentes.

Page 32 - A cette page, la SOGREAH revient à des déclarations plus nuancées concernant le problème de Dagana et je ne peux qu'être d'accord avec ses conclusions.

Page 33 - Quelle que soit la nature réelle du phénomène Dagana, les résultats obtenus pour les crues de réglage entre Dagana et Saint-Louis sont conformes au contrat.

Page 36 Tronçon Gouina-Bakel  
Je suis d'accord sur les conclusions de la SOGREAH concernant le renforcement de l'information, mais je mettrai particulièrement l'accent sur l'étalonnage précis de Bakel et de Kidira, ainsi que sur la campagne altimétrique complémentaire. Les limnigraphes me semblent moins importants pour des raisons d'exploitation dont je parlerai ultérieurement. En ce qui concerne le Kolimbiné et le Karakoro, des campagnes de mesure seraient une bonne chose, mais je ne suis pas certain qu'en ce qui concerne le Sénégal lui-même les frais investis dans ces campagnes puissent se justifier. Si de telles études peuvent apporter quelque chose à des aménagements locaux, ou servir de base à des études plus générales concernant l'écoulement dans les régions sahariennes, il en va tout autrement.

Page 37 D'accord pour les conclusions de SOGREAH pour des études complémentaires sur le tronçon Bakel-Kaédi. Même position pour Niorde, Ghorfa et Gorgol que pour Kolimbiné et Karakoro ; ici la position est toutefois plus nette (dans le sens favorable) si on envisage un aménagement du Gorgol.

- Page 37      Tronçon Kaédi-Dagana : Accord complet avec toutes les propositions de SOGREAH, en insistant particulièrement sur les contrôle de niveling des échelles, non seulement pour les zéros, mais également, s'il y a lieu, pour le calage des éléments entre eux.
- Page 39      - La question de Dagana apparaît vraiment comme un problème crucial de la basse vallée. D'accord avec les propositions SOGREAH.
- Page 40      - La conclusion de la SOGREAH concernant le réglage du modèle est importante. Elle montre, si l'on en est d'accord, et je le suis, que le réglage est parvenu en son état optimal et qu'il serait déraisonnable de chercher à l'améliorer compte tenu des connaissances actuelles.
- annexe 1    (Etude des surfaces inondées en fonction du temps)
- Page 2      - Il faut avant tout savoir si l'inventaire des surfaces inondées présente un grand intérêt à l'amont de Bakel, autrement dit quelle est l'importance des cultures de décrue dans ce bief. Si cette importance est faible, peut-être ne justifie-t-elle pas l'emploi du modèle. De toute manière, il ne serait pas très réaliste, pour la vallée à l'aval de Bakel, d'effectuer l'inventaire en introduisant les débits à Gouina et à Kayes alors qu'on dispose de séries importantes à Bakel. A ce point de vue, il faut bien distinguer entre cette étude d'inventaire qui porte sur le passé et considère le fleuve en son état naturel, et l'étude de l'influence d'un éventuel aménagement amont sur les cultures de décrue.
- G'est la raison pour laquelle j'insiste encore la nécessité de disposer d'une version du modèle partant de Bakel comme condition aux limites amont. Le fait que l'étalonnage actuel de Bakel pose un problème ne paraît pas être un obstacle à cette conception. On pourra quand on le voudra obtenir un étalonnage correct tenant compte du comportement non univoque de la relation HQ.
- Cette éventualité est du reste envisagée par la SOGREAH à la page 3 de cette annexe ; mais contrairement à la Société, je ne pense pas que le

.../...

doute qui plane sur la qualité des relevés antérieurs à 1951 puisse remettre en cause leur utilisation. Même si ces relevés comportent de petits aléas qui, d'après les études critiques de l'ORSTOM, ne peuvent bouleverser sérieusement l'estimation des débits, l'augmentation de l'échantillon statistique qu'on peut en tirer compense très largement la dispersion propre qu'ils pourraient entraîner.

Pour le reste de la page 3, je suis en gros d'accord avec la SOGREAH ; il est évident qu'on peut combiner à loisir les éléments disponibles pour tel but qu'on se sera fixé. Peut-être conviendrait-il de prendre à cette présente réunion une décision à ce sujet.

Pages 4 et 5 - Par contre je ne suis pas du tout la Société sur le procédé qu'elle propose, suivant ses termes, de "bâtir une statistique...". Les résultats qu'on pourrait en tirer échapperaient à tous tests que l'on pourrait élaborer pour juger de leur degré de vraisemblance.

En ce qui concerne le comportement, inconnu dans le passé, des accidents intermédiaires entre Bakel et la mer, les affluents (Niorte, Ghorfa, et Gorgol) ou l'affluent Aftout es Sahel, posent un problème très différent de celui qui est posé par les lacs ou l'endiguement rive gauche du delta. Ces derniers sont, ou seront dans l'avenir, contrôlés artificiellement ; on est donc maître, le modèle une fois réglé, de leur faire suivre le comportement que l'on désire ; en propre, ils n'apportent ni ne sous-tendent rien au Sénégal sur quoi on ne puisse avoir un contrôle effectif (j'excepte l'évaporation des lacs qui ne pose pas de problème important d'estimation.)

Pour les affluents et l'effluent, il est inutile de chercher des méthodes raffinées : rien ne viendra combler la lacune des observations en ce qui les concerne. Il serait mieux dangereux de masquer le problème en ayant l'air de lui chercher une solution qui ne pourrait être qu'une pauvre solution et inciter à une confiance qui ne saurait être méritée. Pour les affluents il faudra donc nécessairement mettre leur influence au compte des dispersions supplémentaires regrettables certes mais iné-

vitables de toutes façons. L'erreur peut être estimée pour un an ou deux, mais les résultats n'étant pas transposables, cette démarche même, proposée par la SOGREAH comme palliatif, me paraît inutile pour le problème de l'inventaire. Négliger, pour ce problème, les apports des affluents, autrement dit les supposer nuls tous les ans, ne peut aller que dans le sens de la sécurité et d'une manière qui ne doit pas être trop exagérée ; tricher au contraire dans le processus de calcul des crues artificielles fabriquées avec un matériel statistique non seulement insuffisant, mais pratiquement incontrôlable. Il en irait tout autrement si l'on l'on disposait sur ces affluents d'un échantillon d'observations permettant au moins de se faire une idée sommaire de la statistique de leurs crues.

Pour l'effluent, il n'est pas possible de ne pas tenir compte des débits distraits du Sénégal. La solution proposée par la SOGREAH (relation avec le maximum à ROSSO) est certainement la meilleure.

Page 6 et 7

- De toutes façons, pour le problème de l'inventaire, il devra être procédé à un fonctionnement simulé pour toutes les crues connues du Sénégal (1903 à nos jours) et de façon homogène, avec une seule loi moyenne Z (Q) à Saint-Louis. La correction évaporation-précipitations ne me paraît pas indispensable mais ce n'est pas une grosse affaire de l'introduire sous forme de données moyennes.

Je me permets d'insister encore sur la différence de conception des données dans la phase réglage et dans la phase utilisation. Le réglage se fait avec un petit nombre de crues et il est normal de choisir celles pour lesquelles on possède les données les plus complètes permettant de circonscrire au mieux le phénomène physique ; il est en effet inutile de laisser dans l'ombre des influences qui risquent d'augmenter la dispersion des résultats. L'exploitation requiert au contraire le passage du plus grand nombre possible de crues afin de disperser d'un échantillon aussi grand que possible pour l'analyse statistique des résultats dont la précision dépend grandement de la faille de l'échantillon. Il y a donc un compromis entre la précision que l'on peut obtenir pour une crue isolée et

.../...

celle qui résulte du nombre de crues disponibles. Comme le traitement doit être homogène, si l'on ne dispose que d'un très petit nombre de crues dont on connaît bien tous les éléments, comme c'est le cas ici, ces crues, précieuses pour le réglage, seront ramenées sur le même plan que les autres en ce qui concerne l'exploitation.

Le travail dans le bief Gouina Bakel, qui inclut les apports de la Falémé, se présente différemment du fait que cette dernière ne peut absolument pas être considérée comme un facteur correctif. Mais pour la Falémé, il doit être possible de construire une statistique fort vraisemblable vu le nombre relativement important d'années d'observations.

Je ne suivrai pas la SOGREAH dans sa proposition du paragraphe 4 "autre variante". La construction de chronique de débits journaliers par des processus stochastiques n'est absolument pas au point dans aucun pays au monde malgré les énormes efforts fournis par d'éminents groupements scientifiques tels que celui du Pr. Yovdjievich à Fort Collins. De plus, je ne vois pas très bien ce que ces techniques, intéressantes pour d'autres problèmes, apporteraient ici.

annexe 2 - Le problème des données à introduire se pose à peu de choses près comme pour l'inventaire. Pour le reste, je ne ferai pas de commentaires préalablement à la discussion.

annexe 3 Je me bornerai à faire remarquer que pour répondre à la question posée dans cette annexe une seule crue la crue de projet sera à prendre en considération.

## Deuxième partie : Conclusions

Si l'on essaye de regrouper les remarques précédentes et d'en dégager des conclusions pratiques, on rencontre successivement :

### Le problème du réglage du modèle maillé

Il paraît actuellement terminé. La SOGREAH déclare, et je le pense aussi, qu'il n'est pas possible d'améliorer ce réglage dans les conditions actuelles de connaissance du milieu physique : essentiellement topographie et apports.

Dans l'état actuel, les résultats concernant les crues de réglage répondant à très peu près aux exigences contractuelles. Restent à examiner les passages des crues de contrôle.

Les "butées" du réglage actuel sont, d'après la SOGREAH :

- l'imprécision sur le nivellation et ses décalages systématiques ;
- l'absence de cartes précises en quelques endroits ;
- la connaissance par trop sommaire des accidents intermédiaires secondaires ;
- l'imprécision de l'étalonnage de la Falémé à Kidira, du Sénégal à Bakel et à Dagana.

Toutes ces "butées" peuvent être reculées si l'on s'en donne la peine. Le tout est de savoir si le jeu en vaut la chandelle et ce n'est pas évident du tout, au moins pour certains éléments. Il paraît hors de doute que les stations clefs de Bakel, de Kidira et de Dagana doivent faire l'objet de la plus grande sollicitude dans les années à venir. Il paraît moins évident que le coût de stations suivies régulièrement et régulièrement étalonnées sur la Karakoro, le Gorgol, etc..., soit justifié par les avantages qu'on peut en tirer pour le modèle, à moins que d'autres impératifs les rendent indispensables, au moins pour certaines d'entre elles.

Quant au nivellation, il appartiendrait à la SOGREAH de nous conseiller sur son opportunité.

Personnellement, je serais enclin à ne plus toucher au réglage, sauf si par la suite on est amené à apporter des modifications au modèle.

#### Le problème de l'exploitation du modèle

Autant pour le réglage, je suis partisan d'une analyse poussée des éléments en entrée ainsi que d'introduire les données les plus complètes possibles, autant pour l'exploitation je pense qu'il est inutile de perdre du temps à ce genre d'opération. Le plus important pour les résultats est de travailler sur des échantillons les plus grands possibles pour lesquels on ne distinguera jamais de données valables, par exemple, sur les apports intermédiaires.

.../...

Il est difficile actuellement de prévoir tous les avantages qu'on pourra tirer du modèle mathématique du Sénégal ni tous les aménagements qui pourront être envisagés. Si l'on s'en tient aux problèmes évoqués par le 3ème rapport semestriel de la SOGREAH, la nature des entrées devrait être :

- soit pour la période la plus longue possible :

- les débits et hauteurs en tête de vallée avec éventuellement les débits de la Falémé élaborés d'une façon ou d'une autre si on s'intéresse au bief à l'amont de Bakel ;
- si l'on veut, les données évaporation-précipitations (moyennes pour la période) et estimée très approximativement ;
- une loi moyenne  $Z(t)$  à Saint-Louis et c'est tout.

... pour les questions de simulation

soit les données relatives à une crue de projet uniquement débits en entrée du Sénégal à Bakel.

Ces questions devraient naturellement être revues dans le cas d'aménagements échappant à l'emprise du modèle (amont de Gouina) et modifiant par conséquent les données à l'entrée. De même, s'il n'est pas impossible que certains aménagements puissent modifier les conditions aux limites aval ( $Z(t)$  à Saint-Louis), quoiqu'il soit peu probable que de tels aménagements aient une grande influence sur la vallée en amont du delta.