INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE GEOLOGIE DE NANCY

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE NANCY

Laboratoire de Géomécanique

Laboratoire de mécanique des terrains

ECOLE DOCTORALE PROMEN

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES DE GENIE CIVIL ET MINIER

ETUDE DE LA RECHARGE DES NAPPES AQUIFERES DE BIDI AU BURKINA FASO

par

Anne-Paule ETRILLARD

ORSTOM

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

Laboratoire d'Hydrologie

Montpellier

Sous la direction de :

Mars-septembre 1994

M. J.M. LAMACHERE

SOMMAIRE

INTRODUCTION	p. 1
PREMIERE PARTIE : LA REGION DE BIDI ET SON BAS-FON	ND
I. CONTEXTE PHYSIQUE ET BIOCLIMATIQUE	p.5
 A. Situation géographique 1. Un pays d'Afrique 2. Orographie 3. Hydrographie B. Géologie C. Climat D. Pédologie E. Végétation naturelle du bas-fond 	
II. L'EAU, LE SOL ET LE SOUS-SOL	p.12
A. Hydrologie B. Hydrogéologie	
III. L'UTILISATION DE L'EAU	p.16
A. Une population rurale B. L'usage traditionnel du bas-fond C. Les aménagements hydrauliques	
DEUXIEME PARTIE : L'INFILTRATION SUPERFICIELLE D LE BAS-FOND DE BIDI	ANS
I. ESTIMATION DE L'INFILTRATION SUPERFICIELLE DANS LE FOND DE BIDI-GOURGA	BAS- p. 23
 A. Méthode : le bilan hydrique dans la retenue du barrage B. L'estimation des termes du bilan 1. Les volumes d'eau déstockés 2. Les apports d'eau 3. Les pertes d'eau aux interfaces a. Les fuites 	

. ***	
b. L'évaporation c. L'infiltration C. Le calcul des vitesses d'infiltration dans la retenue 1. Forme générale 2. Exemple de calcul a. Le volume déstocké b. Les apports c. Les fuites d. L'évaporation e. Le bilan et le calcul de la vitesse	
II. LES RESULTATS	p. 29
 A. Les vitesses d'infiltration et leurs variations B. Les facteurs explicatifs Quels pourraient-ils être? Les variables explicatives proposées pour l'A.C.P. L'Analyse en Composantes Principales Première A.C.P. Deuxième A.C.P. C. Commentaires et hypothèses Deux hypothèses envisageables Une première esquisse de modèle 	
III. MODELISATION DE L'INFILTRATION SUPERFICIELLE A. L'infiltration superficielle dans la retenue du barrage de Gourga 1. Relation Vitesse-Surface a. Pour les petites surfaces b. Pour les surfaces importantes c. Synthèse 2. Relation Vitesse-Cote B. Transposition aux autres sites 1. Hypothèses et méthode 2. La transposition a. Cas de la digue filtrante b. Cas de la station de Tilli	p.37
IV. CALCUL DE L'INFILTRATION A. La méthode 1. Les données 2. Comment allons-nous procéder? B. Les programmes de calcul des durées de submersion et des lames infiltrées 1. Un exemple de fonctionnement de ces programmes a. Calcul de durées de submersion b. Calcul de lames infiltrées 2. Les programmes	P-47

C. Les résultats 1. Influence de l'existence d'un ouvrage 2. Influence de la gestion de la passe du barrage 3. Lames d'eau infiltrées au droit des piézomètres	
TROISIEME PARTIE :ETUDE DES RELEVES PIEZOMETRIQU	JES
I. LES OBSERVATIONS	P-61
 A. Variations des niveaux piézométriques en fonction du temps Ligne piézométrique n°1 Ligne piézométrique n°3 Ligne piézométrique n°4 Ligne piézométrique n°5 B. Visualisation des résultats Profil en long Profils en travers Comparaison de profils en amont et en aval du marigot En amont du barrage C. Submersion et variations des niveaux piézométriques 	
II. ELEMENTS D'INTERPRETATION	p.65
 A. Les décalages temporels entre les réponses des piézomètres d'une même ligne 1. Cas de la ligne n°2 2. Cas de la ligne n°5 B. Les différences de vitesse de décroissance des niveaux piézométriques 1. Vitesses de décroissance et gradients de charge 2. Vitesse et profil géologique C. Relation submersion-variation des niveaux piézométriques 	
III. MODELISATION DE L'INFILTRATION ET DE LA RECHARGE	p.77
A. Eléments pour une modélisation 1. Définitions a. Teneur en eau du sol b. Degré de saturation c. Potentiel de l'eau dans le sol 2. Etat du sol et infiltration B. Application au bas-fond de Bidi 1. Les données 2. Les hypothèses C. Bilan hydrique sur une colonne de sol 1. Méthode 2. Les termes du bilan a. Volume infiltré depuis la surface (Vinf) b. Volume rejoignant la nappe (Vnappe)	

3. Modélisation	
CONCLUSION	p.89
BIBLIOGRAPHIE	p.93
ANNEXES	p.97

c. Volume s'écoulant en profondeur et sur les côtés (Vprof)

3. Exemple de calcul

4. Résultats
D. Pour aller plus loin
1. Travaux
2. Expériences

a. Calcul de Vinfb. Calcul de Vnappec. Calcul de Vprof

a. Concernant la zone saturée
b. Concernant la zone non saturée

LISTE DES FIGURES

- Figure n°1 : Coupe transversale d'un bas-fond.
- Figure n°2 : Bloc diagramme de la partie médiane du bas-fond de Bidi.
- Figure n°3 : Répartition des cultures de saison humide dans un bas-fond.
- Figure n°4 : Coupe technique transversale de la digue filtrante.
- Figure n°5 : Coupe technique transversale du barrage.
- Figure n°6 : Mode de calcul des variables explicatives proposées pour l'A.C.P..
- Figure n°7 : Cercle des corrélations (1er essai).
- Figure n°8 : Cercle des corrélations (2er essai).
- Figure n°9 : Coupe transversale du bas-fond au droit de la ligne piézomètrique n°2.
- Figure n°10 : Coupe transversale du bas-fond au droit de la ligne piézomètrique n°4.
- Figure n°11 : Coupe transversale du bas-fond au droit de la ligne piézomètrique n°5. Figure n°12 : Exemple de calcul de durées de submersion.
- Figure n°13 : Exemple de calcul de lames infiltrées.
- Figure n°14 : Algorithme du programme de calcul des durées de submersion.
- Figure n°15 : Coupe longitudinale du bas-fond avec représentation des fluctuations du niveau piézomètrique.
- Figure n°16: Variations du niveau piézomètrique sous la ligne n°2 en 1989.
- Figure n°17: Variations du niveau piézomètrique sous la ligne n°5 en 1989.
- Figure n°18 : Coupe transversale du bas-fond sous la ligne n°4 avec représentation de l'évolution de la piézomètrie et de la surface de la retenue du barrage.
- Figure n°19: Situation du substratum granitique sur une coupe longitudinale du bas-fond.
- Figure n°20 : Profil géologique sous la ligne piézomètrique n°4.
- Figure n°21 : Potentiel de pression matricielle en fonction de la teneur en eau pour un sol sableux et un sol argileux.
- Figure n°22 : Modèle de fonctionnement du bas-fond.

LISTE DES CARTES

- Carte n°1 : Situation du Burkina Faso dans l'Afrique de l'Ouest.
- Carte n°2 : Situation de la province du Yatenga au Burkina Faso.
- Carte n°3 : Situation de Bidi dans la province du Yatenga. Carte n°4 : Carte du bassin-versant du barrage de Tilli.
- Carte n°5 : Carte de l'équipement hydropluviométrique en 1989.
- Carte n°6 : Carte des emplacements des piézomètres et puits de pompage.
- Carte n°7 : Carte des campements et quartiers du village de Bidi.
- Carte n°8 : Carte du substratum granitique.

LISTE DES GRAPHES ET TABLEAUX

Tableau n°1	: Vitesse d'infiltration et facteurs explicatifs.
Graphe n°1	: Vitesse d'infiltration et cote de la retenue.
Graphe n°2	: Vitesse d'infiltration et surface de la retenue.
Graphe n°3	: Vitesse d'infiltration et durée de submersion.
Graphe n°4	: Ajustement de la relation vitesse d'infiltration-surface de la retenue.
Graphe n°5	: Vitesse d'infiltration et surface de la retenue avec influence de la durée de submersion.
Graphe n°6	: Ajustement de la relation vitesse d'infiltration-surface de la retenue avec prise en compte de la durée de submersion.
Graphe n°7	: Vitesse d'infiltration et cote de la retenue avec influence de la durée de submersion.
Graphe n°8	: Ajustement de la relation vitesse d'infiltration-cote de la retenue avec prise en compte de la durée de submersion.
Tableau n°2	: Durées de submersion pour les différents sites aux mêmes largeurs de submersion.
Graphe n°9	: Durées de submersion pour les différents sites dans la partie centrale du bas- fond.
Graphe n°10	: Durées de submersion pour les différents sites dans la zone submergée par des crues moyennes.
Tableau n°3	: Durées de submersion au droit des piézomètres.
Tableau n°4	: Lames infiltrées au droit des piézomètres; première méthode de calcul.
Tableau n°5	: Lames infiltrées au droit des piézomètres; deuxième méthode de calcul.
Tableau n°6	: Variations de la piézométrie et submersion des piézomètres.
Tableau n°7	: Vitesses et gradients de charge sous la ligne piézomètrique n°2.
Tableau n°8	: Vitesses et gradients de charge sous la ligne piézomètrique n°3.
Tableau n°9	: Vitesses et gradients de charge sous la ligne piézomètrique n°5.

LISTE DES ANNEXES

Annexe n° l	: Graphe des relevés limnimétriques à la retenue du barrage pour l'année 1989.
Annexe n°2	: Débit de fuite du barrage en fonction de la cote de la retenue.
Annexe n°3	: Relation cote-surface et relation cote-volume pour la retenue du barrage.
Annexe n°4	: Calcul de l'évaporation à Gourga en 1988 et au début de la saison humide 1991.
Annexe n°5	: Listings des programmes de calcul des durées des submersion et des lames infiltrées.

INTRODUCTION

Notre objectif est la compréhension du fonctionnement de la recharge des nappes aquifères situées sous le bas-fond de Bidi et l'appréciation de l'influence de la présence des deux ouvrages de rétention d'eau aménagés sur le marigot sur cette recharge.

Dans une première partie, nous découvrirons le village de Bidi au Burkina Faso. La présentation des caractéristiques tant naturelles (hydrologie, géologie, pédologie,...) qu'humaines (répartition de la population, activité,...) de cette région posera les bases de notre étude.

Ensuite, nous utiliserons les données hydrométriques superficielles, à savoir les différents relevés de cotes limnimétriques réalisés sur le marigot pendant plusieurs saisons des pluies. Nous travaillerons dans un premier temps sur le site de la retenue du barrage de Gourga, sur laquelle nous estimerons la vitesse à laquelle l'eau s'infiltre dans le sol tout en essayant de cerner les paramètres qui l'influencent. Nous verrons dans un deuxième temps dans quelle mesure et après quelles adaptations ces premiers résultats peuvent être utilisés sur d'autres sites du même marigot. Nous intègrerons enfin toutes ces données dans un programme informatique, réalisé dans le cadre de cette étude, lequel nous permettra d'avoir une première estimation des quantités d'eau qui s'infiltrent dans le sol du le bas-fond.

Nous poursuivrons notre étude par l'analyse des relevés piézométriques effectués en différents endroits du bas-fond pendant la même période. Le fait de considérer le problème "dans l'autre sens" nous permettra, après modélisation de la recharge, d'une part de vérifier la validité de nos précédents résultats, en confrontant les valeurs des lames d'eau infiltrées avec les bilans des flux hydriques dans les colonnes de sol entourant les piézomètres, et d'autre part de tester la cohérence de nos hypothèses concernant les profils d'altération et leurs caractéristiques hydrodynamiques.

•		

PREMIERE PARTIE

LA REGION DE BIDI ET SON BAS-FOND

	·	

I. CONTEXTE PHYSIQUE ET BIOCLIMATIQUE

A. Situation géographique

1. Un pays d'Afrique

Situé entre 10 et 15 degrés de latitude Nord, et entre 0 et 5 degrés de longitude Ouest, le Burkina Faso a une superficie de 274 200 km². Ses voisins sont le Mali, le Niger, le Bénin, le Togo, le Ghana et la Côte d'Ivoire (voir carte n°1). Sa capitale est Ouagadougou (environ 400 000 habitants en 1994). Il est divisé en 10 provinces. Le Burkina Faso s'appelait autrefois la Haute-Volta, jusqu'à l'arrivée au pouvoir de Thomas Sankara en 1984.

La région de Bidi se trouve à une cinquantaine de kilomètres au Nord-Nord-Ouest de Ouahigouya, chef-lieu de la province du Yatenga (voir cartes n°2 et 3).

2. Orographie

Le Burkina Faso est un pays plutôt plat : l'écart entre les altitudes extrêmes est inférieur à 600 mètres, avec une altitude moyenne de moins de 400 mètres. On peut distinguer deux grands ensembles topographiques :

- une pénéplaine qui occupe les trois-quarts du pays, avec un relief très monotone; elle correspond à des roches datant du Précambrien;
- un massif gréseux, au Sud-Ouest du pays, très élevé (jusqu'à 749 mètres) et très accidenté, plus récent.

Bidi et la province du Yatenga sont situés sur la pénéplaine, à une altitude de 350 mètres environ. Les bas-fonds sont nombreux au Burkina Faso; un exemple de coupe de bas-fond est donné sur la figure n°1.

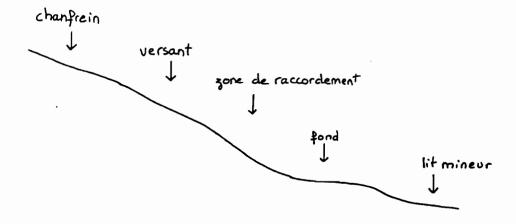
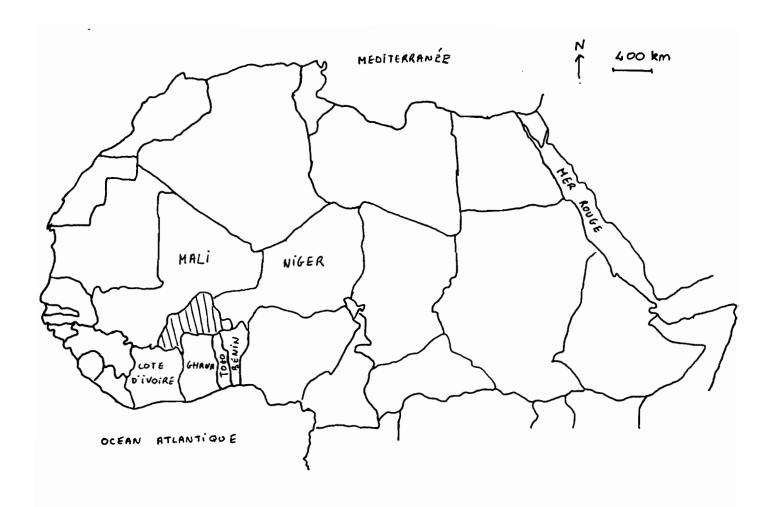
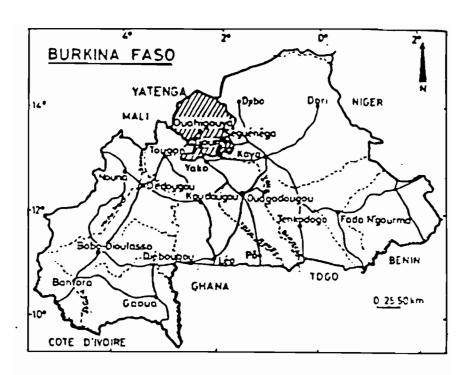


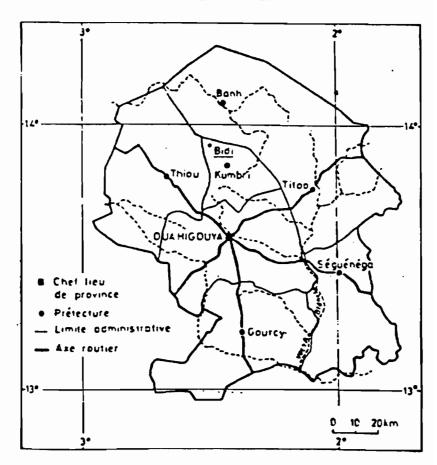
Figure n°1 : coupe schématique d'un bas-fond



Carte n°1 : Situation du Burkina-Faso dans l'Afrique de l'Ouest



Carte n°2 : situation de la province du Yatenga au Burkina-Faso



Carte n°3 : Situation de Bidi dans la province du Yatenga

Le bas-fond de Bidi, long de 30 km, peut être divisé en quatre parties (LAMACHERE et al.,1991):

- une partie amont dont la pente est inférieure à 1 %, avec un profil transversal concave et une zone centrale étroite (moins de 50 m), où le bassin versant drainé a une superficie de moins de 10 km²,
- une partie médiane, avec une pente plus ou moins forte (de 2 à 4 pour mille) selon que le fond est plus ou moins étroit, où le profil transversal a la forme d'un V évasé et le bassin versant fait moins de 200 km²,
- une partie aval, avec une pente inférieure à 2 pour mille; le fond y prend la forme d'une plaine large de 300 m, avec des mares temporaires,
- l'exutoire du marigot, constitué par un système d'épandage endoréique en delta; le bas-fond s'y divise en deux branches, séparées par un cône de déjection, formant chacune une plaine de 500 à 1000 m de large avec une pente de moins de 1,5 pour mille.

3. Hydrographie

Les cours d'eau du Burkina Faso se rattachent à trois grands bassins :

- ceux des Volta Blanche, Noire et Rouge (aujourd'hui appelées Nakambé, Mou Houn et Nazinon).
- celui de la Komoé,
- celui du Niger.

Cependant, le bas-fond de Bidi ne se place pas au sein d'un de ces bassins. L'eau qu'il concentre s'écoule vers la plaine de Gondo, vaste système endoréique au Nord-Ouest du Burkina Faso. Il existe ainsi au Nord du pays de nombreuses mares sans écoulement, qui se trouvent en dehors du réseau hydrographique général, mais qui jouent un rôle important dans la vie des habitants.

B. <u>Géologie</u>

Le bouclier Ouest-africain, où se situe le Burkina Faso, est constitué de roches granitiques ou sédimentaires métamorphisées du Précambrien moyen et inférieur. Il correspond au socle pénéplané que nous avons déjà mentionné. Une couverture sédimentaire repose sur ce socle au Nord et au Nord-Ouest du pays, où elle est représentée par des grès et des schistes primaires et infra cambriens, ou par des grès, des sables et des argiles tertiaires. C'est cette couverture sédimentaire qui forme les reliefs élevés et accidentés du Sud-Ouest du pays.

Les cuirasses latéritiques sont présentes presque partout, en général en association avec des terrains d'âge précambrien. Elles forment souvent des collines tabulaires, et correspondent alors aux restes d'anciens niveaux de pénéplanation ayant subi les attaques de l'érosion.

A Bidi, le substratum est constitué d'un granite à biotite dont l'âge est estimé à 1980 millions d'années; c'est un granite tarditectonique de l'orogenèse éburnéenne. Le bas-fond de Bidi et son bassin-versant s'inscrivent totalement dans un massif granitique de 60 kilomètres sur 25. La carte n°4 donne une idée de la topographie du substratum.

De la surface vers le sous-sol, la coupe géologique dans le bas-fond de Gourga révèle (voir figure n°2):

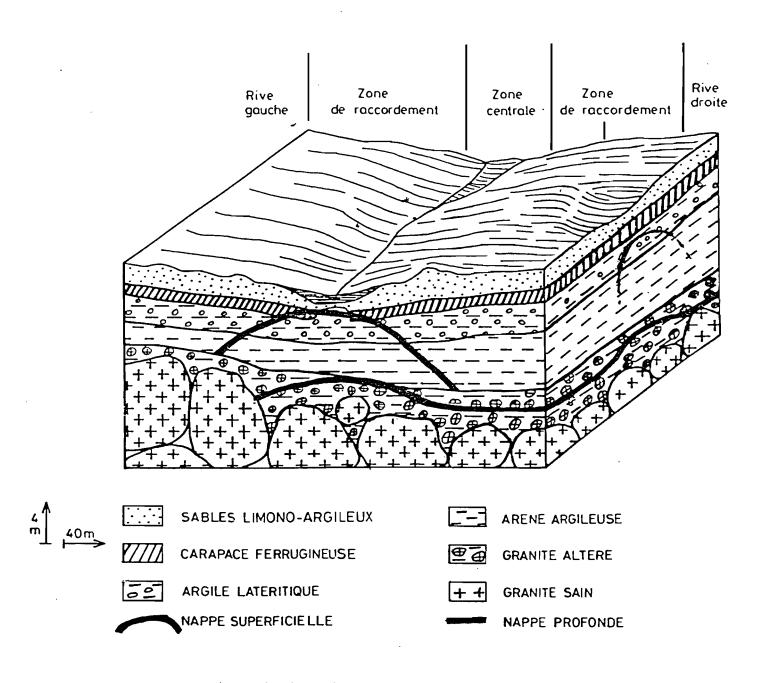


Figure n°2 : bloc-diagramme de la partie médiane du bas-fond de Bidi

- des dépôts sableux éoliens et colluviaux récents, sur une faible épaisseur, présents presque partout, qui forment parfois des microdunes perturbant l'écoulement naturel de l'eau sur les versants faiblement inclinés (cas de la rive gauche du bas-fond de Bidi),
- des latérites ou indurations alumino-ferrugineuses, qui forment une carapace perméable dont l'épaisseur va de 4 à 7 mètres,
- des niveaux argileux (argile latéritique puis arène argileuse), d'une puissance d'une quinzaine de mètres,
- des granites altérés, puis des granites sains, affectés de fractures d'orientation Nord 30 à Nord 45 et Nord 100 à Nord 120, dues à l'orogenèse éburnéenne.

Si on observe la forme générale du marigot de Bidi, on notera son aspect en baïonnette; ceci laisse supposer que le bas-fond "suit" en surface la distribution du réseau de failles souterrainnes.

C. Climat (PERON et al., 1975)

Le climat du Burkina Faso est de type sahélien au Nord d'une ligne Djibo-Dori, soudanien au Sud de cette ligne.

Dans la majeure partie du pays, il est de type Soudanien, avec :

- une saison sèche, de la mi-novembre à la mi-avril, avec des vents secs de secteur Nord-Est à Est, (l'harmattan),
- un premier régime transitoire, avec des incursions d'air humide, de la mi-avril à la mi-juin; c'est à ce moment que l'on observe les plus fortes chaleurs : jusqu'à 35 ou 45 °C le jour, et plus de 20 °C la nuit,
- une saison humide, de la mi-juin à la mi-septembre, avec des épisodes pluvieux orageux, et des températures comprises entre 25 et 30 °C, avec des écarts thermiques faibles; les vents humides de secteur Sud-Ouest à Sud dominent,
- un second régime transitoire, du même type que le premier, de la miseptembre à la mi-novembre; c'est à la fin de cette période que l'on observe les températures les plus fraîches : tout au plus 20 à 30 °C le jour, et souvent moins de 10 °C la nuit.

Les incursions d'air humide débutent dans le Sud-Ouest, puis s'étendent vers l'Est et le Sud-Est. Ces premières pluies sont en général violentes, et érodent fortement les sols desséchés par plusieurs mois de saison sèche.

Cette description doit être nuancée; en effet on peut distinguer :

- le Nord du pays, où les précipitations sont inférieures à 650 mm/an, proches dans le temps, et où les amplitudes thermiques diurnes et annuelles sont fortes (c'est le climat sahélien),
- le Sud-Ouest du pays, qui reçoit plus de 1000 mm de pluie par an, répartis sur 6 mois, et où l'amplitude thermique annuelle est assez faible (climat Nord-soudanien),
- une zone intermédiaire, avec entre 650 et 1000 mm de pluie par an, échelonnés sur moins de 6 mois (climat Sud-soudanien).

La quantité de pluie et sa répartition dans le temps sont les principaux facteurs déterminant la durée de la période des travaux agricoles.

C'est dans cette zone intermédiaire que se situe Bidi. La pluviométrie à Ouahigouya était en moyenne de 720 mm/an pour les années 1920 à 1969, et de 540 mm/an de 1970 à 1991. Elle est moins élevée à Bidi, situé plus au Nord (entre 400 et 600 mm/an), où la

sécheresse des vingt dernières années se fait également sentir. L'évapotranspiration moyenne annuelle, calculée selon la méthode de TURC est supérieure à 2100 mm/an. Le couvert végétal joue ici un rôle important, dans la mesure où il est responsable d'un albédo de 0,25.

D. Pédologie

Les sols cultivables représentent environ 34 % de la superficie du Yatenga. Ils se situent essentiellement sur les formations sableuses, dans les petites dépressions, dans les plaines alluviales, et dans les bas-fonds. Ce sont d'une manière générale des "sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et lessivés sur matériau sableux, sablo-argileux ou argilo-sableux" (PERON et al., 1975).

A Bidi, la zone centrale du bas-fond (voir figure n°1) représente 4 % de la surface du bassin versant et 12 % des terres cultivables. Sur les versants, les sols sont de type ferrugineux peu ou pas lessivés. Les parties amont et médiane du bas-fond sont occupées, dans leurs zones centrales, par des sols peu évolués d'apport alluvial, à texture limono-sableuse en surface, devenant argileuse en profondeur. On observe dans la zone centrale de la partie aval du bas-fond des sols hydromorphes à pseudogley, de texture limono-argileuse à argileuse.

E. Végétation naturelle du bas-fond

Au Burkina Faso, les formations végétales prédominantes sont les steppes, les savanes et les forêts claires. Leur répartition est essentiellement fonction de la pluviométrie annuelle, l'influence du sol se faisant sentir d'une manière plus secondaire; c'est ainsi que l'on distingue trois grands domaines (PERON et al., 1975):

- le domaine sahélien, au Nord, composé de steppes arborées et arbustives (Adansonia digitata, Leptadenia pyrotechnica, Euphorbia balsamifera,...),
- le domaine soudano-guinéen, au Sud, avec des savanes boisées, des forêts claires et des îlots de forêts denses, des galeries forestières (Berlinia grandiflora, Adina microcephala, Elaeis guineensis,...),
- le domaine soudanien, au centre, composé de savanes (Ziziphus mauritania, Lannea acida,...) et de forêts claires (Anogeissus leiocarpus, Pterocarpus erinaceus,...).

La région de Bidi se situe entre la zone sahélienne et la zone soudanienne. La partie amont du bas-fond, dans sa zone centrale et en bordure de celle-ci, est couverte d'une savane arbustive dense ainsi que d'arbres de cueillette cultivés. La partie médiane est en plus plantée de manguiers. Le chanfrein et les versants sont moins recouverts par la végétation naturelle.

Aujourd'hui, le bas-fond est de plus en plus cultivé dans sa partie médiane et même aval; il est planté de riz sur les zones régulièrement inondées, de sorgho sur les zones non engorgées.

II. L'EAU, LE SOL ET LE SOUS-SOL

A. Hydrologie

Le bassin-versant de Gourga-Tilli, dont l'écoulement est concentré dans le bas-fond de Bidi, a, en amont des ouvrages sur lesquels nous allons travailler, une superficie de 47,5 km² (voir carte n°4). Ses altitudes s'échelonnent entre 315 et 372 mètres. Sa classe de relief est R2 fort. Sa classe de perméabilité dans la classification de RODIER est P3 : bassin assez imperméable avec des zones perméables étendues.

Le réseau hydrographique est à tendance radiale dans la partie aval du bassin. Le basfond est alimenté en eau par ruissellement sur les sols nus encroûtés, que l'on trouve sur les versants du bas-fond et qui correspondent à 30 % de la surface du bassin-versant. Ces sols ont une forte capacité de ruissellement (CR>75%). L'agriculture pratiquée sur les sols fins sableux des versants diminue fortement le coefficient de ruissellement (CR) des zones cultivées, grâce au sarclage et au labour. Le coefficient de ruissellement des cultures réaugmente cependant rapidement après de fortes pluies (LAMACHERE, 1991).

De nombreux équipements hydropluviométriques ont été installés sur le site de Bidi : pluviographes, pluviomètres, limnigraphes (voir carte n°5). L'O.R.S.T.O.M. a également aménagé une station climatologique à Nayiri, près de son campement, avec anémomètre, pluviographe, pluviomètre Snowdon, héliographe, bac Colorado,...

B. Hydrogéologie

Il existe des réseaux de fractures majeures dans le domaine granitique. Ces fractures sont profondes, subverticales, avec des zones broyées associées de quelques dizaines à quelques centaines de cm. Elles sont le siège de circulations d'eau souterraines. La forme en baïonnette du marigot rappelle d'ailleurs l'existence de ces failles.

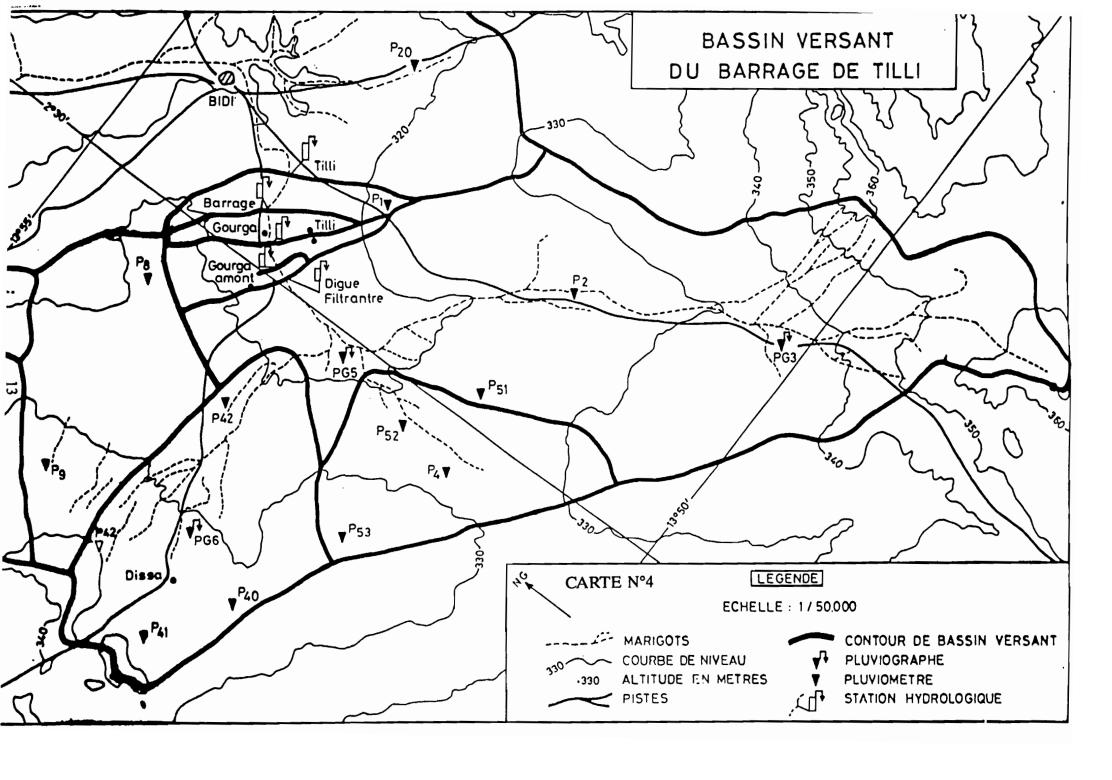
Les relevés piézométriques révèlent l'existence d'une nappe aquifère "supérieure" dans la carapace ferrugineuse et les argiles latéritiques. Située à environ 5 mètres de profondeur, c'est la nappe qui est captée par les puits traditionnels.

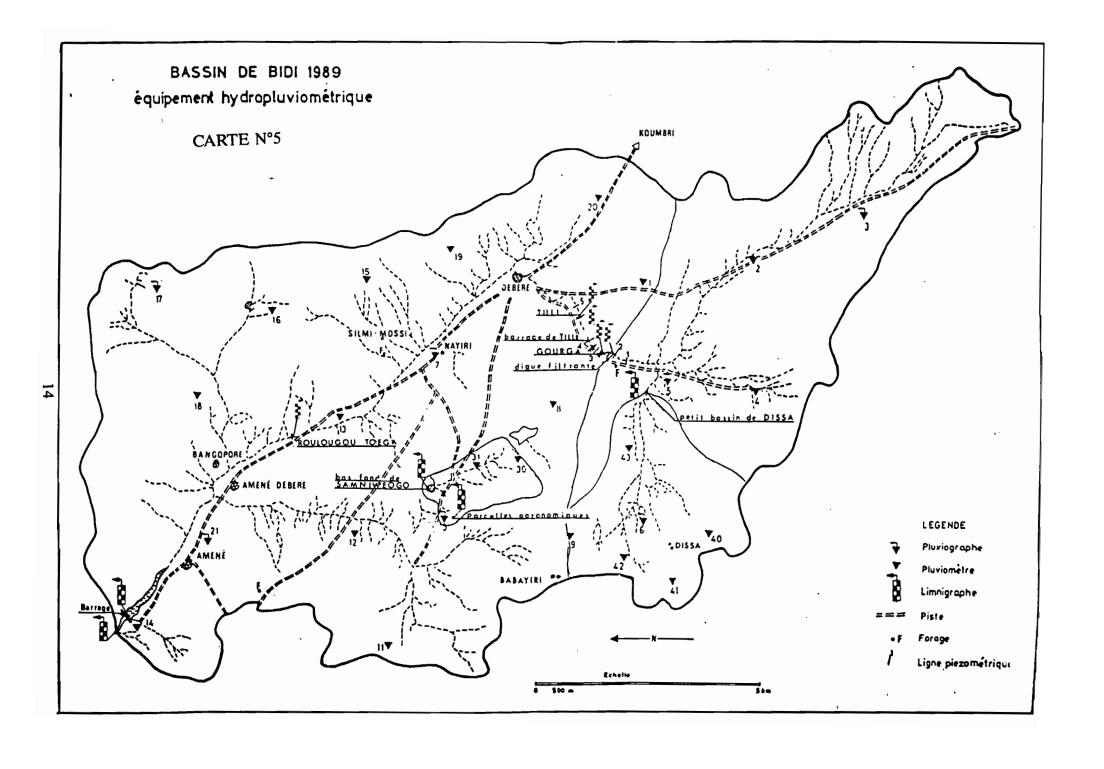
Il existe également une nappe plus profonde, située dans la roche altérée et dans les fractures de la roche saine.

La coupe géologique du bas-fond, présentée dans le bloc-diagramme de la figure n°2, permet de situer approximativement ces deux nappes dans le sous-sol.

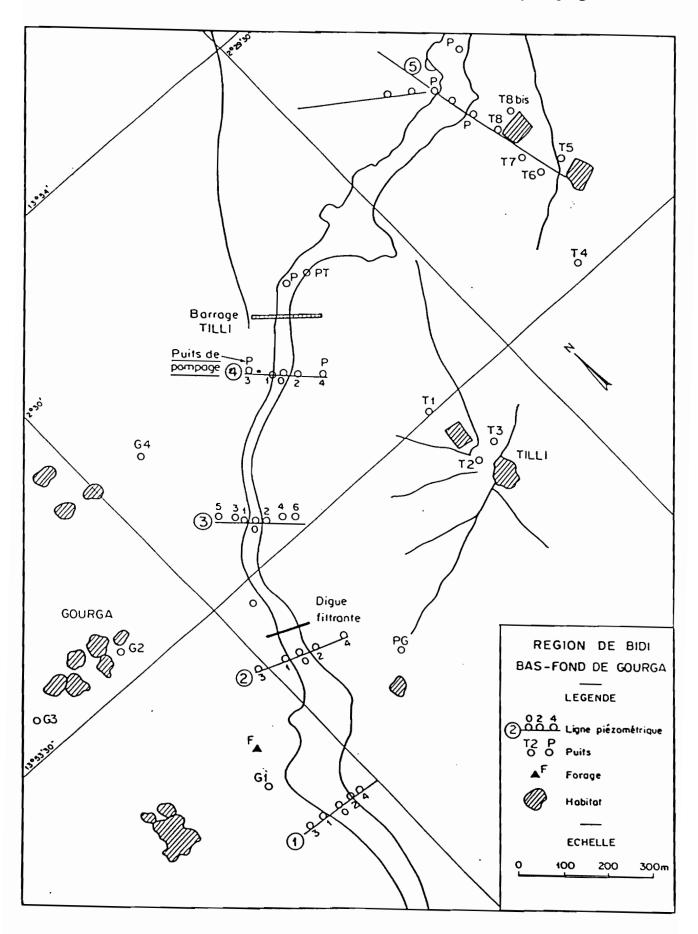
Cinq lignes piézométriques ont été installées sur le bas-fond, de part et d'autre des aménagements hydrauliques (voir carte n°6). Elles permettent de suivre les fluctuations du niveau de la nappe supérieure (seul un piézomètre atteint la nappe profonde). Les puits paysans captent en général les couches latéritiques ennoyées (i.e. la nappe supérieure), mais ils atteignent parfois l'eau qui se trouve dans les cavités entre les blocs de roche saine (i.e. la nappe profonde).

Contrairement à ce qui est parfois observé dans la zone soudanienne, il n'y a pas à Bidi d'alimentation de l'écoulement superficiel par affleurement de la nappe, celle-ci étant trop profonde.





CARTE N°6: Emplacement des piézomètres et puits de pompage



III. L'UTILISATION DE L'EAU

A. Une population rurale

Environ 90 % des Burkinabè sont ruraux. C'est le cas des habitants de Bidi, village dont la population s'est stabilisée depuis une trentaine d'années autour de 3300 habitants grâce à la migration, assez forte dans la tranche d'âge des 15-40 ans. Ces départs ont lieu par exemple vers les plantations et les villes côtières de Côte d'Ivoire et du Ghana. Si le départ des habitants est rarement définitif, leur retour est compensé par de nouveaux départs. La densité est de 42 habitants par km², ce qui est beaucoup pour ce pays pauvre en ressources.

Ce furent les nomades Peuls, éleveurs de gros bétail, qui installèrent les premiers campements dans la région de Bidi, Bidi étant d'ailleurs le pluriel du mot fulfuldé "widizou" qui signifie "puits peu profond" (le fulfuldé est la langue des Peuls). Cependant, ce sont des Rimaïbe, esclaves affranchis des Peuls, qui créèrent le premier quartier de Bidi. Par la suite, d'autres ethnies s'installèrent, telles les Mossi, les Silmi-mossi ou les Forgerons. L'espace fut fractionné de façon que chacun puisse cultiver son terroir.

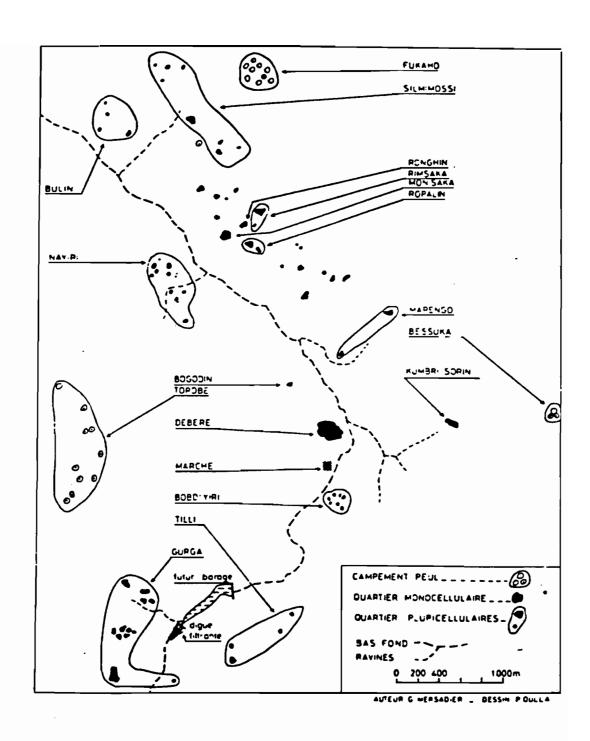
Aujourd'hui, la population de Bidi est composée d'environ 70 % de Mossi, 19 % de Rimaïbe et 11 % de Peuls. La répartition du pouvoir et des tâches est fortement influencée par l'appartenance à une ethnie : les Mossi et les Rimaïbe sont traditionnellement des agriculteurs sédentaires, tandis que les bovins sont confiés aux Peuls semi-nomades.

La répartition des quartiers de Bidi, de part et d'autre du marigot, est indiquée sur la carte n°7. Elle est étroitement liée à l'emplacement des puits et des zones de culture.

B. L'usage traditionnel du bas-fond

Il existe à Bidi aussi bien des éleveurs (Peuls) que des agriculteurs (Mossi et Rimaïbe). La culture principale est celle du mil, pratiquée sur les versants. Traditionnellement, le bas-fond sert d'une part pour la pâture et l'élevage, et d'autre part pour l'arboriculture (production de bois et de fruits).

De plus en plus, la culture du riz et du sorgho, ainsi que le maraîchage, se développent dans le bas-fond. Le riz est cultivé dans les zones les plus basses de la partie médiane, et en marge de la zone centrale dans la partie aval. Le sorgho est planté dans les zones inondées par des crues moyennes. Mil et arachide sont cultivés plus haut sur les versants du bas-fond dans des zones rarement inondées (voir figure n°3). Le maraîchage est pratiqué dans la zone centrale et en marge de celle-ci, pendant la saison sèche (SERPANTIE 1988).



CARTE N°7 : CAMPEMENTS ET QUARTIERS DU VILLAGE DE BIDI -

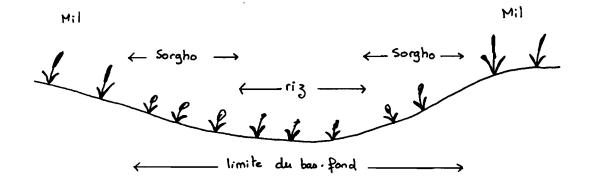


figure n°3: répartition des cultures de saison humide dans un bas-fond (d'après LIDON, 1993)

L'abondance de l'eau pendant la saison des pluies permet le développement des cultures telles que celle du riz et du sorgho. En effet, ces plantes ont un cycle plus long que celui du mil, et sont résistantes, jusqu'à une certaine limite, aux inondations. Le sorgho est d'ailleurs de ce point de vue moins résistant que le riz, ce qui justifie sa culture dans des zones moins fréquemment inondées.

La saison des pluies permet également la recharge des nappes aquifères via l'infiltration de l'eau. En saison sèche, c'est grâce aux puits que les paysans peuvent abreuver le bétail et arroser les cultures maraîchères (oignons, aubergines amères, patates douces...).

La sécheresse, que l'on observe dans la région de Bidi depuis 25 ans, a remis en cause ce fonctionnement. La baisse de niveau de la nappe superficielle a provoqué l'assèchement de nombreux puits, d'où des difficultés pour l'alimentation en eau des hommes, du bétail et des plantes. Le bas-fond est désormais plus utilisé pour la culture du sorgho que pour celle du riz.

C. Les aménagements hydrauliques

En 1986, une digue filtrante fut construite dans le bas-fond de Bidi (voir figure n°4). En effet, pour faire face à la sécheresse qui rendait délicate l'alimentation en eau de certains quartiers du village situés vers l'amont du marigot (Gourga, Tilli, Torobe : voir carte n°7), le groupement des paysans de ces quartiers demanda de l'aide à divers organismes gouvernementaux, non gouvernementaux et de recherche (en l'occurence l'ORSTOM). Ce premier ouvrage, réalisé avec l'étroite coopération des populations locales, avait en partie pour but de vérifier leur motivation et de les "entraîner" à ce genre de travaux. Il fut suivi par la réalisation, en 1988, d'un petit barrage avec bâtardeaux, environ 500 mètres en aval (voir figure n°5).

Le but de ces aménagements est de répondre aux préoccupations des paysans en augmentant la recharge de la nappe, grâce au stockage de l'eau en amont des deux ouvrages, de façon à ce que les puits soient productifs tout au long de l'année. Un objectif secondaire est la valorisation agricole des eaux de ruissellement (qui est d'ailleurs peu développée sur l'ensemble du Burkina Faso), par l'intermédiaire d'essais de riziculture en amont des ouvrages.

Il importe maintenant d'étudier quelle a été l'influence de ces ouvrages sur la recharge des nappes aquifères. S'il est a priori prévisible que celle-ci a été améliorée par la construction de la digue filtrante et du barrage, on ne sait pas en revanche de quelle manière et dans quelles proportions.

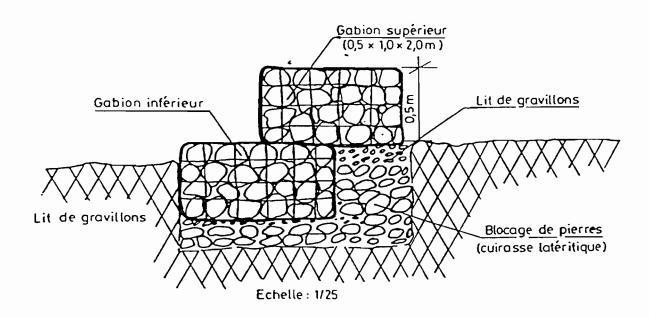


Figure n°4 : coupe technique transversale de la digue filtrante

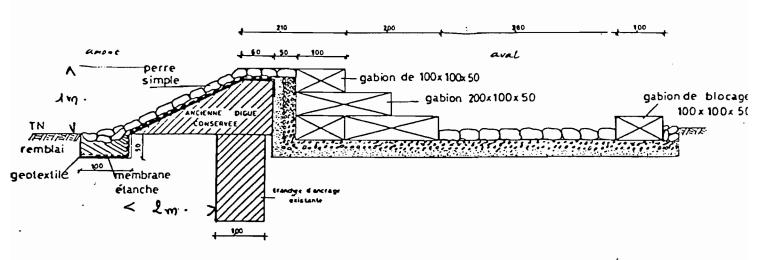


Figure n°5 : coupe technique transversale du barrage

DEUXIEME PARTIE

L'INFILTRATION SUPERFICIELLE DANS LE BAS-FOND DE BIDI

	·	

I. ESTIMATION DE L'INFILTRATION SUPERFICIELLE DANS LE BAS-FOND DE BIDI-GOURGA

A. Méthode: Le bilan hydrique dans la retenue du barrage de Gourga

Le calcul est fait à partir de la chronique des niveaux d'eau dans la retenue du barrage de Gourga pour les années 1988, 1989, 1990 et 1991 (voir par exemple le graphe de l'année 1989 en Annexe n°1).

La vitesse d'infiltration est calculée pendant des laps de temps lors desquels on n'observe:

- ni déversement au travers de la passe centrale ou par dessus le barrage,
- ni arrivées d'eau depuis l'amont.

Pour déterminer ces périodes, on se refère :

- à "l'historique" de la mise en place des batardeaux qui obstruent la passe centrale ainsi qu'à l'allure du graphe des niveaux d'eau dans la retenue en fonction du temps (une baisse très rapide de ce niveau après une crue est signe que l'eau se déverse),
 - à la chronique des débits ou des cotes à la station Gourga-amont.

Le fait de se placer sur des périodes ainsi sélectionnées permet de diminuer le nombre de termes qui interviendront dans le bilan, et surtout de minimiser l'erreur faite sur l'estimation des volumes.

Le bilan des entrées et sorties d'eau dans la retenue pendant une durée déterminée permet alors d'estimer la vitesse d'infiltration. En effet, il suffit d'appliquer la relation :

V infiltré =
$$\Delta V + V$$
 pluie - V évaporation - V fuites

- avec : V infiltré = volume d'eau qui s'infiltre sous la retenue,
 - ΔV = varition du volume de la retenue sur la période de calcul,
 - V pluie = volume d'eau précipité sur la retenue,
 - V évaporation = volume d'eau évaporé par la surface de la retenue,
 - V fuite = volume d'eau perdu à cause des fuites du barrage.

Nous allons définir plus précisément chacun des termes de ce bilan.

B. L'estimation des termes du bilan

1. Les volumes d'eau déstockés

Un abaque (présenté en Annexe n°3) a été construit qui permet de connaître le volume d'eau contenu dans la retenue en fonction de la cote de celle-ci. Il a été construit grâce à un autre abaque donnant la surface de la retenue en fonction de sa cote (voir Annexe n°3).

A l'aide de l'abaque des volumes, on calcule le volume d'eau déstocké pendant la période étudiée.

Vd est toujours positif, puisqu'on s'est placé sur des périodes lors desquelles il n'y a pas d'apports d'eau depuis l'amont, donc le niveau de la retenue diminue.

2. Les apports d'eau

Ils sont exclusivement dus à la pluie, puisque nous nous sommes sciemment placés dans des conditions telles qu'il n'y ait pas d'apports d'eau depuis l'amont.

Un pluviomètre installé aux abords du barrage a fourni la chronique des pluies pour les années 1989, 1990 et 1991. Ce pluviomètre n'étant pas encore installé en 1988, les hauteurs d'eau tombées sur la retenue cette année-là ont été estimées à l'aide des pluviomètres n°1 et 8 installés respectivement à 1500 et 2000 mètres du barrage sur les rives gauche et droite du marigot (voir carte n°5). Nous avons considéré que la moyenne quotidienne de ces deux valeurs était une bonne approximation de la pluviométrie au barrage.

Le volume d'eau apporté par la pluie en 24 heures est :

$$Vp = h * s$$

avec h = hauteur d'eau tombée le jour de l'averse,

s = surface de la retenue à minuit ce jour-là. En effet, le relevé des pluviomètres ayant toujours lieu le matin à 7 heures, et la pluie tombant en général pendant la nuit, il est préférable de prendre cette valeur, plutôt que celle correspondant à la surface vers midi, par exemple.

La surface de la retenue en fonction de sa cote est donnée par un abaque. Celui-ci a été construit grâce à un nivellement topographique réalisé à l'aide d'un niveau de chantier. Toutes les mesures ont été rapportées à un zéro commun situé au niveau du radier de la passe du barrage.

3. Les pertes d'eau aux interfaces

a. Les fuites

Les fuites ont été observées et mesurées en aval du barrage. Elles sont dues au fait que:

- la partie aval du barrage est fait de blocs de roches au travers desquels l'eau peut passer,
- la partie amont du barrage, réalisée en terre argileuse, n'est pas parfaitement étanche en raison de sa trop faible épaisseur (voir coupe technique du barrage figure n°5).

Ces fuites ont fait l'objet de jaugeages, qui ont permis la réalisation d'un abaque donnant le débit des fuites en fonction de la cote dans la retenue (voir Annexe n°2). Pour les calculs, cette courbe a été décomposée en une succession de portions de droites.

Le volume d'eau perdu à cause des fuites lors d'une période est calculé comme suit :

$$Vf = Q * T$$

avec - Q : débit de fuite moyen sur une période

- T : durée de la période.

b. L'évaporation

Un bac flottant gradué, installé sur la retenue, a permis de mesurer quotidiennement l'évaporation. Le volume d'eau perdu en 24 heures est :

$$Ve = h * s$$

avec - h : hauteur d'eau évaporée le jour considéré

- s : surface moyenne de la retenue ce jour-là.

Ce bac flottant n'était pas encore installé en 1988. Par contre, des mesures de l'évaporation au bac Colorado ont été réalisées en 1988, 1989, 1990 et 1991 à la station climatologique de Nayiri, distante de quelques kilomètres du barrage (voir carte n°5). Pour avoir une estimation de l'évaporation journalière au barrage en 1988, nous avons cherché une corrélation entre :

- l'évaporation mesurée au bac Colorado à Nayiri

et

- l'évaporation mesurée au bac flottant au barrage de Gourga

pour les années 1989, 1990 et 1991. Nous en avons déduit une estimation de l'évaporation au barrage en 1988. Cette méthode a également permis de "retrouver" les valeurs de l'évaporation au début de la saison humide 1991, période à laquelle le relevé n'avait pas été fait. Le détail de cette petite étude est exposé en Annexe n°4.

c. l'nfiltration

C'est le terme inconnu du bilan, que nous allons justement déterminer grâce à la connaissance des autres termes.

C. Le calcul des vitesses d'infiltration dans la retenue

1. Forme générale

Le volume infiltré est égal à la différence entre le volume déstocké ajouté au volume des pluies d'une part, et le volume des pertes par évaporation et occasionnées par les fuites d'autre part. On calcule donc le volume d'eau infiltré pendant la période grâce à la relation suivante :

puis on en déduit la vitesse d'infiltration, donnée en hauteur d'eau par unité de temps :

avec s : surface moyenne pendant la période étudiée

T : durée de la période

2. Exemple de calcul

Considérons la période comprise entre le 27 août à 6 heures et le 2 septembre 1989 à minuit (voir le graphe en Annexe n°1).

a. Volume déstocké

Le 27 août à 6 heures, le niveau de la retenue est à la cote 680 cm, ce qui correspond à un volume stocké de 14200 m³. Le 2 septembre à minuit, la cote est de 663 cm, soit un volume stocké de 8640 m³.

Le volume destocké est donc :

$$Vd = V (27/08 \text{ à } 6 \text{ h}) - V (2/09 \text{ à minuit})$$

 $Vd = 14200 - 8640 = 5560 \text{ m}^3$

b. Apports

Il est tombé 0,5 mm d'eau le 28 août. Etant donné que le relevé a été fait dans la matinée du 29 août, et qu'il a probablement plu pendant la nuit du 28 au 29, nous considèrerons que l'averse a eu lieu le 28 août à minuit lorsque la retenue était à la cote 675 cm. Cette cote correspond à une surface de 33000 m2, d'où :

$$Vp = surface * hauteur$$

 $Vp = 33000 * 0.5 * 10^{-3} = 16.5 m^3$.

De même il est tombé 4,5 mm d'eau le 31 août, ce qui donne $Vp = 129,6 \text{ m}^3$. En tout, on a donc $Vp = 146,1 \text{ m}^3$.

c. Fuites

La cote varie entre 680 et 663 cm, pendant 162 heures. En se référant à l'abaque donnant le débit de fuite en fonction de la cote de la retenue, on calcule le débit de fuite moyen entre ces deux cotes, en assimilant cette portion de courbe à une droite :

Qf moyen =
$$(Q (cote680) + Q (cote663)) / 2$$

Qf moyen = $(5,18+3,9) / 2 = 4,54 \text{ l/s}$

et le volume d'eau perdu est :

$$Vf = Qf moyen (1/s) * 3600 * T /1000$$

$$Vf = 4.54 * 3600 * 162 / 1000 = 2647.7 m3$$

d. Evaporation

On calcule jour par jour le volume d'eau évaporé. Lorsqu'une journée n'est pas complète, le volume est calculé au pro-rata du nombre d'heures compris dans notre période.

Le 27 août, la hauteur d'eau évaporée est de 8,5 mm. La cote moyenne entre 6 heures et 24 heures est de 679 cm, ce qui correspond à une surface de 35400 m². Le volume évaporé est donc :

Ve =
$$(18/24)$$
 * hauteur * surface
Ve = $(18/24)$ * 8,5 * 10^{-3} 35400 = 225,7 m³

On procède de même pour les autres jours :

Le 28/08	h = 9 mm	cote moyenne = 676,5 cm	$Ve = 305,1 \text{ m}^3$
Le 29/08	h = 4 mm	cote moyenne = 674 cm	$Ve = 129,6 \text{ m}^3$
Le 30/08	h = 5 mm	cote moyenne = 671,5 cm	$Ve = 154,5 \text{ m}^3$
Le 31/08	h = 9 mm	cote moyenne = 669 cm	$Ve = 264,6 \text{ m}^3$
Le 01/09	h = 10 mm	cote moyenne = 666,5 cm	$Ve = 279 \text{ m}^3$
Le 02/09	h = 6 mm	cote moyenne = 664 cm	$Ve = 158,4 \text{ m}^3$

Au total, le volume évaporé est 1516,9 m³

e. Le bilan et le calcul de la vitesse

Le volume infiltré vaut :

$$Vinf = (Vd + Vp) - (Vf + Ve)$$

 $Vinf = (5560 + 146,1) - (2647,7 + 1516,9) = 1541,5 \text{ m}^3.$

La surface moyenne sur cette période est de 30900 m². On peut maintenant calculer la vitesse d'infiltration :

II. LES RESULTATS

A. Les vitesses d'infiltration et leurs variations

Le tableau n°1 reprend les résultats de nos calculs.

La première colonne donne la référence de la période sur laquelle le calcul a été fait. Le premier chiffre indique l'année ("8" signifie 1988, "9" 1989, etc...), le second indique le numéro de la période à l'intérieur de cette année.

Il y a eu en tout 33 calculs.

Les vitesses sont données en millimètres par jour, les cotes sont en centimètres, et les surfaces en mètres carrés. La cote et la surface données sont respectivement la cote et la surface moyenne pendant la période considérée.

Les graphes n°1 et 2 représentent les variations de la vitesse d'infiltration en fonction de la cote ou de la surface de la retenue. Il est clair qu'il existe sans doute une relation mathématique, plus ou moins simple, faisant intervenir plus ou moins de paramètres, donnant la vitesse d'infiltration en fonction de la cote de la retenue ou de sa surface.

B. Les facteurs explicatifs

1. Quels pourraient-ils être?

Nous avons calculé pour chaque période certains facteurs qui nous paraissaient susceptibles d'avoir une influence sur la valeur de la vitesse d'infiltration : ils ont trait à la durée pendant laquelle une surface a été submergée (dsub), à l'importance de la crue précédant la période étudiée (pcmax), à son éloignement dans le temps (dpcmax), au temps qui s'est écoulé depuis la dernière période sèche (daps). Il apparait en effet comme certain que les vitesses d'infiltration ne sont pas les mêmes pour un sol saturé et pour un sol peu humecté, de même que la taille de la surface immergée a probablement une influence sur la vitesse d'infiltration.

Les valeurs de ces facteurs sont repris dans le tableau n°1, en parallèle avec les valeurs de la vitesse d'infiltration.

Il est apparu en première analyse qu'il existait certainement une relation entre la vitesse et la surface de la retenue (graphe n°2). Nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales faisant intervenir différents paramètres afin de déterminer quels étaient ceux qui pouvaient expliquer la vitesse et nous permettre de préciser la relation entre la surface de la retenue et la vitesse d'infiltration.

2. Les variables explicatives proposées pour l'ACP

- "daps" : durée depuis la dernière période sèche. C'est le temps qui s'est écoulé entre la dernière fois que la retenue a été asséchée et le début de la période étudiée.

		Tableau n°1 : récapitulatif des valeurs des vitesses						
		d'infiltration						
					_	_		
Nom	période	v.infiltration		surface	dadps	dsub	pcmax	dpcm
		(mm/jr	(cm)	(m2	(heures)	(heures)	(cm)	(heures)
	aout	50	602	4420	264	90	629	180
	septembre	13	671.5	30900	900	114	699	30
	septembre	10	655.5	22480	1056	270	699	198
	septembre	4.2	636.5	14530	1206	798	699	348
8.5	octobre	32.6	601	4260	1524	1122	699	672
9.1	juillet	54.6	600.5	3880	72	66	636	66
	juillet	52	581.5	1130	282	276	613	84
	aout	16.2	676	33600	54	48	714	42
	aout-sept	7.4	671.5	30900	660	654	695	108
	septembre	6.8	658	23600	930	6	666	6
	septembre	11.1	642	16500	1068	1062	666	144
9.7	septembre	20.8	619.5	9250	1188	1182	666	264
9.8	sept-oct	33	587.5	2550	1362	1356	666	438
	juillet	52	585.5	2030	198	192	602	6
0.2	juillet	54.5	594.5	3200	84	84	676	30
0.3	juillet	36.1	603.5	4770	258	42	721	42
	juillet	42.1	585	1570	330	330	721	114
	aout	41.5	585	1900	444	18	602	12
	aout	27.6	619	9120	198	192	634	6
0.7	aout	46.3	589	2420	360	354	634	168
0.8	aout-sept	43.4	585.5	2030	30	30	607	30
0.9	septembre	57.2	600	4400	12	12	619	6
0.101	septembre	49.2	592.5	3460	162	18	613	12
1.1	mai	12.6	667.5	28820	108	90	689	54
1.2	juin	47.6	589.5	2030	804	798	720	240
1.3	juin	48.4	600.5	4090	918	6	609	6
1.4	juillet	52.7	588.5	1680	1008	96	598	6
1.5	juillet	19.1	655	21800	1296	198	716	198
1.6	juillet	9.9	647	18370	1350	252	716	252
1.7	septembre	6.9	675.5	33600	2760	870	700	156
1.8	septembre	10.1	650	19735	3078	1404	700	474
	sept-oct	14.1	622	10245	3210	1542	700	612
1.101	octobre	25.6	610.2	6530	3564	18		12

- "dsub" : durée de submersion. C'est la durée pendant laquelle la cote moyenne de la période étudiée est inférieure aux niveaux d'eau, c'est-à-dire la durée pendant laquelle cette cote de la retenue est sous l'eau.
- "pcmax" : point de cote maximale. Cette cote correspond à la dernière pointe de crue précédant la période étudiée.
- "dpcm" : durée depuis "pcmax". C'est la durée qui s'est écoulée entre la dernière pointe de crue et le début de la période étudiée.
 - "cot" : cote moyenne sur la période étudiée.
 - "surf": surface moyenne sur la période étudiée.

Le mode de calcul de ces différentes variables est repris sur la figure n°6.

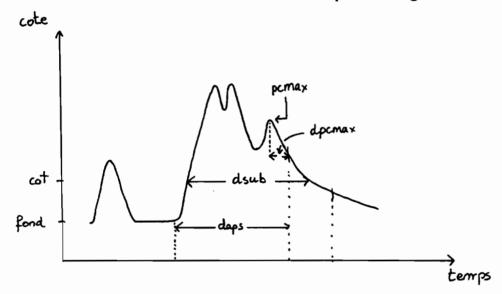


Figure n°6: mode de calcul des variables explicatives proposées

3. L'Analyse en Composantes Principales

a. Première A.C.P.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une A.C.P.avec, pour chaque variable, les valeurs qu'elle prend pour chaque période, c'est-à-dire les valeurs du tableau n°1.

La contribution à la variation totale des deux premiers axes est de 81,8 %, ce qui est un bon résultat. Le cercle des corrélations correspondant est donné sur la figure n°7.

Cette première analyse nous révèle que la vitesse est plutôt bien corrélée avec les variables explicatives que nous avons choisies. Cependant, elle ne permet pas de comparer précisément les influences respectives de chaque variable sur la vitesse, celles-ci étant trop "tassées" vers les mêmes valeurs de coordonnées suivant l'axe 1. De plus, elle ne nous permet pas de voir si, pour chaque variable, les valeurs faibles et les valeurs fortes ont la même influence sur la vitesse. C'est pourquoi nous avons procédé à une deuxième A.C.P., en subdivisant les variables en classes de valeurs faibles, moyennes ou fortes.

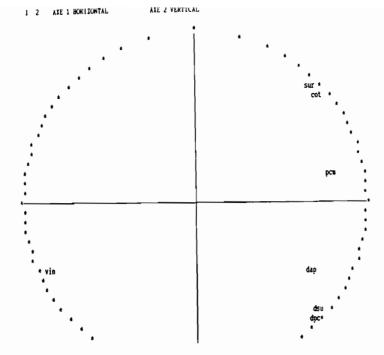


Figure n°7 : cercle des corrélations (1er essai)

b. Deuxième A.C.P.

Cette fois nous avons défini des classes pour chaque variable :

- "dsub": p (petite), durée de 6 à 96 heures m (moyenne), durée de 114 à 354 heures g (grande), durée de 654 à 1542 heures

- "dpcm": pte (petite), durée inférieure à 84 heures gde (grande), durée supérieure à 108 heures

- "pcmax" : bas (basse), cote inférieure à 636 cm hau (haute), cote supérieure à 666 cm

-"daps": pre (proche), durée de 12 à 444 heures mil (milieu), durée de 660 à 1068 heures loi (loin), durée de 1188 à 3564 heures

-"vinf": fai (faible), vitesse inférieure à 30 mm/jr for (forte), vitesse forte, supérieure à 30 mm/jr

Nous avons de plus défini une variable supplémentaire, "sais", qui contient le mois dans lequel se situe la période observée. C'est une variable qui comporte trois classes : "jui" (mois de mai, juin et juillet), "aou" (mois d'août), et "sep" (mois de septembre).

Toutes ces variables ne contiennent que des 0 et des 1, selon que la période observée se place dans l'une ou l'autre classe de chaque variable.

Le cercle des corrélations suivant les deux axes principaux est repris sur la figure n°8.

Cette A.C.P. permet de préciser les corrélations qui avaient été pressenties lors du premier essai. On observe que les valeurs élevées de la vitesse sont fortement corrélées avec les valeurs faibles de la durée de submersion, du point de cote maximale, de la distance au point de cote maximale, et de la distance à la dernière période sèche. Inversement, les valeurs faibles de la vitesse sont fortement corrélées aux valeurs fortes de ces mêmes variables.

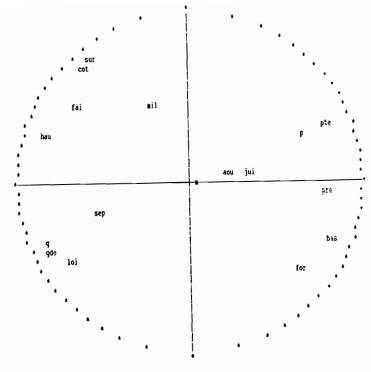


figure n°8 : cercle des corrélations (2ème essai)

On note que la saison n'explique la vitesse qu'au mois de septembre (en fin de saison humide, donc), et qu'alors la vitesse est faible.

Enfin on observe que surface et cote sont les deux variables qui se situent le plus près de la vitesse, en l'occurence lorsqu'elle est faible, sur le cercle des corrélations.

En observant comment les variables se répartissent sur les axes, on peut tenter de donner une signification à chaque axe :

- l'axe 1 serait l'axe de la durée d'immersion, car dpcm, pcm, dsub et daps ont des coordonnées élevées sur cet axe.
 - l'axe 2 serait l'axe de la surface immergée.

On peut alors dire que, comme la vitesse est fortement corrélée à l'axe 1, elle est plus expliquée par "l'histoire" de la surface immergée, c'est-à dire par tout ce qui s'est passé avant la période sur laquelle on a mesuré la vitesse, que par l'importance de cette surface.

C. Commentaires et hypothèses

1. Deux hypothèses envisageables...

Certaines corrélations élevées entre vitesse d'infiltration et variables explicatives sont assez facilement interprétables quand on se réfère au profil géologique du bas-fond (figure n°2); c'est le cas pour :

- "daps". La vitesse d'infiltration est élevée lorsque la dernière période sèche est proche : le sol, et en particulier son horizon supérieur sableux, est sec, et a donc tendance à absorber l'eau rapidement. En revanche, lorsque la dernière période sèche est éloignée, la vitesse est plus faible : on peut penser qu'une fois l'horizon sableux saturé, l'infiltration est ralentie par les niveaux argileux sous-jacents.
- "dsub" et "dpcm". La forte corrélation entre ces deux variables et la vitesse d'infiltration (vitesse faible pour dsub forte et dpcm grande) s'explique de la même façon : un sable sec absorbera l'eau rapidement, tandis qu'une fois qu'il sera saturé, l'eau sera arrêtée par l'argile.

- "sais", ou plutôt "sep". Les vitesses en fin de saison humide sont toujours inférieures à 35 mm/jr (sauf en 1990, année qui fut extrêmement sèche) : l'horizon sableux étant saturé, l'eau circule, plus lentement, à travers l'argile.

En revanche, il est moins évident d'expliquer le fait qu'à des surfaces immergées élevées correspondent des vitesses d'infiltration faibles, et vice-versa. Ce phénomène est observé sous deux formes :

- en début de saison humide, ou pendant toute la saison 1990 (année sèche), on note que le niveau de la retenue est bas et que les vitesses d'infiltration sont élevées (jusqu'à 57 mm/jr). On peut penser que l'horizon sableux, successivement immergé et émergé, absorbe l'eau rapidement;
- en fin de saison humide, après les dernières crues, on observe que la surface diminue et que la vitesse augmente, tout en restant inférieure à 33 mm/jr. Comme on est en fin de saison des pluies, à des niveaux plutôt bas de la retenue, les sols ayant été longtemps submergés, il est probable que l'horizon sableux soit complètement saturé, et que les niveaux argileux sous-jacents le soient également. On sait que la perméabilité d'une argile augmente avec sa teneur en eau, jusqu'à être maximale à saturation. On peut donc proposer comme explication pour l'augmentation de la vitesse le fait que, l'argile arrivant à saturation, sa perméabilité augmente.

Si on regarde la coupe géologique (figure n°2), une deuxième hypothèse est envisageable. Elle consisterait à dire que la carapace ferrugineuse située sous les sables limono-argileux se comporte comme un réservoir qui serait alimenté par la zone centrale du bas-fond. Cette alimentation se ferait essentiellement par là puisque c'est là que la couche de sables limono-argileux est la plus perméable. Ceci expliquerait le fait que pour des surfaces immergées petites la vitesse d'infiltration soit élevée (vidange de la retenue dans ce réservoir), et que pour des surfaces importantes cette vitesse soit faible : elle est forte dans la zone centrale et faible sur les côtés, donc faible en moyenne sur l'ensemble de la retenue. En fin de saison humide, le fait que les vitesses soient toujours élevées pour des surfaces faibles mais moins qu'en début de saison pourrait s'expliquer, dans le cadre de cette hypothèse, par le fait que le réservoir constitué par la carapace ferrugineuse est saturé, et que sa vidange dans les niveaux inférieurs se fait lentement.

2. Une première esquisse de modèle

On peut supposer que le bas-fond est constitué d'une partie centrale plus perméable que ses versants. Sur les versants, une fois les couches supérieures sableuses saturées, c'est la couche inférieure argileuse moins perméable qui commande la vitesse d'infiltration.

D'après la courbe v = f (surface) (graphe n°2), on pourrait diviser le bas fond en deux zones :

- une zone à forte infiltration, au centre (pour des cotes inférieures à 600 cm), qui aurait une superficie comprise entre 4 et 5000 m², et dans laquelle la vitesse d'infiltration varierait entre 40 et 50 mm/jr,
- la zone supérieure dans laquelle la vitesse d'infiltration serait de l'ordre de 5 mm/jr.

Toutes ces hypothèses proposent des explications purement qualitatives, ce qui n'est pas pleinement satisfaisant. Par exemple, il faudrait voir si la perméabilité des argiles rencontrées est compatible avec les valeurs des vitesses d'infiltration calculées. La suite du

rapport, qui portera sur l'étude des niveaux piézométriques aux abords de la retenue, permettra de vérifier la validité de ces hypothèses, voire de les préciser.

Nous allons maintenant essayer de voir comment les résultats que nous avons dégagés quant à l'infiltration au niveau de la retenue de Gourga peuvent être utilisés afin de déterminer l'infiltration sur l'ensemble du marigot.

III. MODELISATION DE L'INFILTRATION SUPERFICIELLE

A. L'infiltration superficielle dans la retenue du barrage de Gourga

Nous allons chercher à mettre en équation la vitesse d'infiltration dans la retenue du barrage de Gourga avec d'autre facteurs dont on a vu qu'ils l'influençaient, de façon à obtenir une relation mathématique que nous essaierons ensuite de transposer à d'autres sites. Ceci nous permettra d'estimer l'infiltration en divers points du marigot.

Les graphes qui nous paraissent les plus facilement utilisables sont les graphes Vitesse-Cote et Vitesse-Surface (graphes n°1 et 2). Ceux qui mettent en relation la vitesse avec les autres paramètres sont en revanche nettement moins facilement interprétables (voir par exemple le graphe n°3 représentant la vitesse en fonction de la durée de submersion). Nous allons interpréter ces deux graphes : celui donnant la vitesse en fonction de la surface, car c'est celui pour lequel l'existence d'une relation est la plus évidente, et celui considérant la cote, car c'est la relation Cote-Vitesse que nous pourrons par la suite essayer de transposer aux autres sites, beaucoup plus facilement que la relation Surface-Vitesse.

1. Relation Vitesse-Surface

Vu l'allure du graphe, nous avons tenté d'ajuster la vitesse au logarithme de la surface. Il s'est avéré que c'est en utilisant le logarithme népérien que l'on obtenait la meilleure corrélation avec une droite (le coefficient de régression linéaire valant alors 0,887). Avec les paramètres de cette droite (pente, ordonnée à l'origine), nous sommes revenus au graphe originel que nous avons comparé à la courbe ainsi calculée. Le résultat de cet ajustement figure sur le graphe n°4.

Si le résultat est plutôt satisfaisant, il paraît cependant améliorable, en particulier en ce qui concerne les valeurs extrêmes de la surface.

a. Pour les petites surfaces

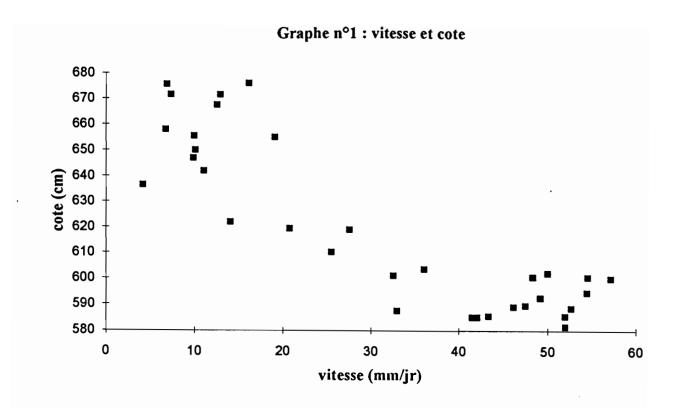
La droite d'ajustement traverse un nuage de points. Si on observe le graphe donnant la relation vitesse-surface en fonction de la durée de submersion (graphe n°5), on remarque que la partie supérieure de ce nuage de points correspond aux valeurs faibles de la durée de submersion, tandis que sa partie inférieure correspond à des valeurs plus élevées de cette durée. Nous avons utilisé cette observation pour affiner la relation Vitesse-Surface.

En ne considérant, dans un premier temps, que les points pour lesquels la durée de submersion est inférieure à 354 heures, nous avons trouvé une nouvelle relation entre la vitesse et le logarithme népérien de la surface :

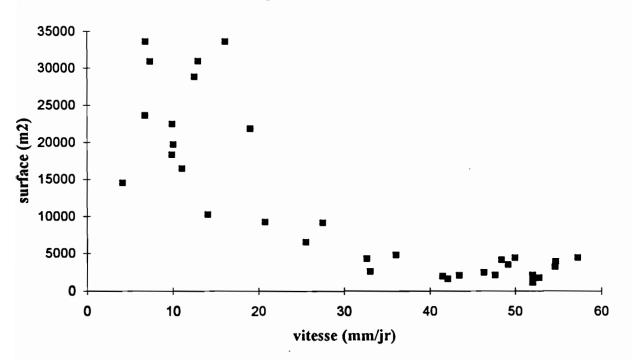
vitesse =
$$-17,85*ln(surface)+190,7$$

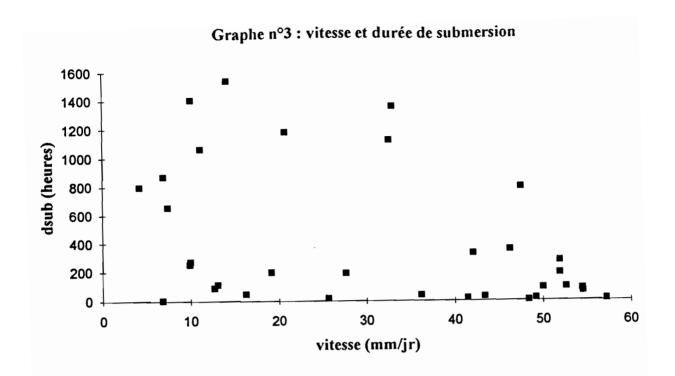
Le coefficient de régression linéaire vaut alors 0,875.

Nous avons considéré ensuite les points pour lesquels la durée de submersion est supérieure à 654 heures; cette fois la relation est :

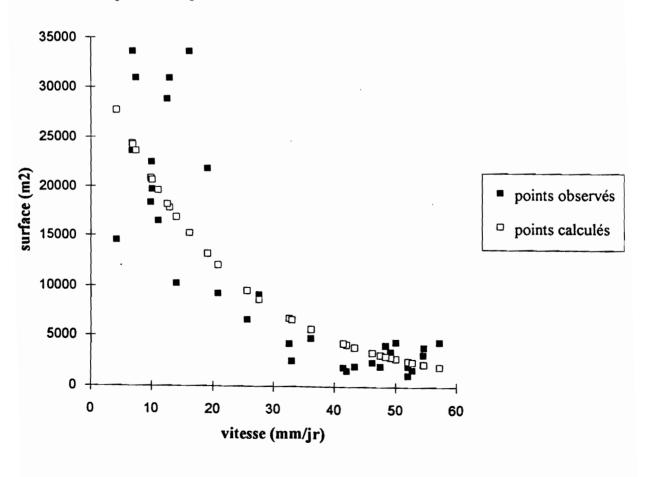


Graphe n°2: vitesse et surface

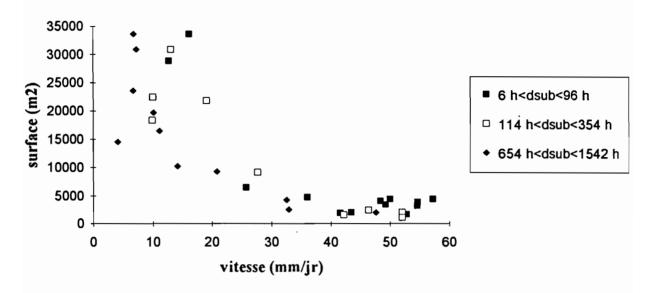




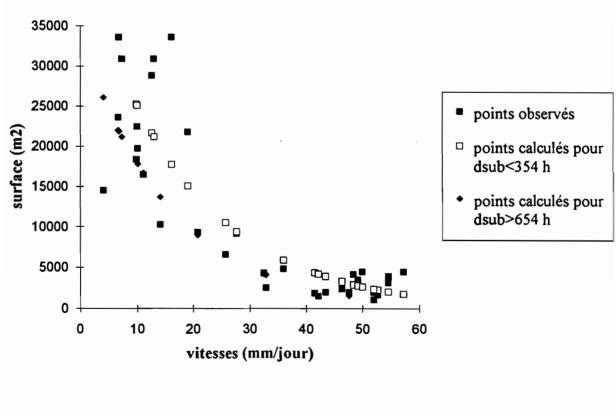
Graphe n°4: ajustement de la relation vitesse-surface



Graphe n°5: vitesse et surface avec distinction de la durée de submersion



Graphe n° 6 : ajustement de la relation vitesse-surface avec prise en compte de la durée de submersion



vitesse =
$$-15,5*ln(surface) + 161,6$$

avec un coefficient de régression linéaire de 0,942, c'est-à-dire bien meilleur que le premier.

b. Pour les surfaces importantes

Aucune des trois courbes d'ajustement que nous avons calculées jusqu'à maintenant ne passe vraiment pas les points observés, mais on observe que la distinction entre fortes et faibles durées de submersion est encore valable. C'est pourquoi nous allons améliorer la relation initiale en considérant que pour des surfaces supérieures à une certain seuil, la vitesse d'infiltration sera constante et égale à une certaine valeur. Ce seuil et cette valeur seront fonction de la relation prise en compte pour des surfaces faibles.

c. Synthèse

Si la durée de submersion pour une surface donnée est inférieure à 504 heures (ce qui correspond à une moyenne entre 354 et 654), on aura :

- v = constante = 14 mm/jr si cette surface est supérieure à 20000 m²,

-v = 190,7-17,85*ln(surf) si cette surface est inférieure à 20000 m².

Si cette durée de submersion est supérieure à 504 heures, alors :

- v = constante = 8 mm/jr si la surface est supérieure à 20000 m²,

-v = 161,6-15,5*ln(surf) si la surface est inférieure à 20000 m².

Ces relations sont reprises sur le graphe n°6.

2. Relation Vitesse-Cote

Le graphe se prête bien à un ajustement par portions de droites, ceci est probablement à mettre en raport avec le fait que la relation entre la cote de la retenue et la surface correspondante a une forme exponentielle (voir Annexe n°3). Comme on pouvait s'y attendre, nous avons été amenés à opérer les mêmes subdivisions à l'intérieur du graphe, en tenant compte de la durée de submersion (voir graphe n°7).

Si la durée de submersion est inférieure à 504 heures, alors :

- v = constante = 14 mm/jr pour des cotes supérieures à 650 cm,
- -v = 404,3-0,6*cote pour des cotes moins élevées.

Si la durée de submersion est de plus de 504 heures, alors :

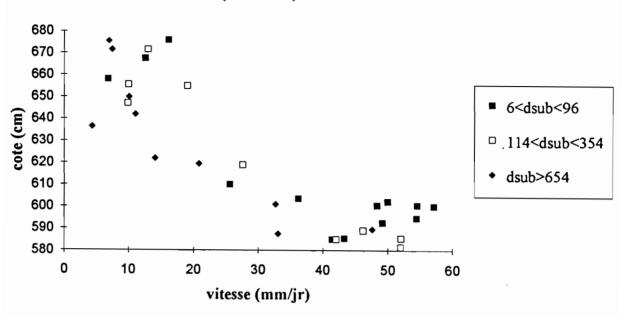
- v = constante = 8 mm/jr pour des cotes supérieures à 650 cm,
- -v = 351,85-0,53*cote pour des cotes moins élevées.

Les coefficients de régression linéaire dans le cas de durées de submersion faibles puis fortes sont respectivement de 0,9 et 0,87, ce qui est satisfaisant.

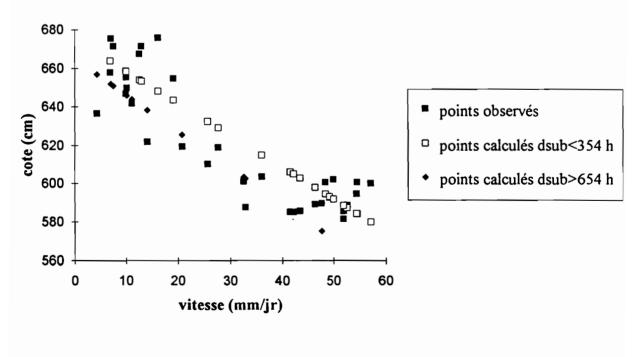
Ces résultats sont repris dans le graphe n°8.

Ces résultats sont valables pour la retenue du barrage de Gourga; il importe maintenant de voir dans quelles conditions on peut les transposer dans d'autres points du marigot, afin de pouvoir estimer l'infiltration superficielle sur d'autres sites.

Graphe n°7: vitesse et cote avec influence de la durée de submersion (en heures)



Graphe n°8 : ajustement de la relation vitesse-cote avec prise en compte de la durée de submersion



B. Transposition aux autres sites

Nous avons cherché à transposer les relations liant la vitesse avec la cote du niveau d'eau. Cette transposition a été effectuée pour les sites de Tilli et de la digue filtrante, là où des stations limnimétriques étaient installées, l'objectif étant l'estimation des volumes infiltrés en tout point du bas-fond au cours de sa submersion. Deux éléments sont nécessaires pour estimer ces volumes : les vitesses d'infiltration et les durées de submersion; nous cherchons ici les vitesses.

1. Hypothèses et méthode

L'hypothèse principale consiste à dire que la partie centrale du bas-fond et ses versants ont un comportement identique de la ligne piézométrique n°2 à la ligne piézométrique n°5 en passant par le bief de Gourga.

Nous supposerons que le palier de changement de la relation donnant la vitesse en fonction de la cote de la retenue a lieu, pour les différents sites, à largeur de submersion égale avec la largeur submergée dans la retenue du barrage de Gourga. Cette supposition a l'interêt de bien représenter le fait que l'infiltration se fait par le fond de la retenue, selon la nature du sol et du sous-sol, mieux que ne le ferait par exemple une hypothèse consistant à dire que le passage d'une relation à une autre se fait à hauteur d'eau égale.

Pour le barrage, la relation liant cote et vitesse n'est pas la même selon que l'on est en dessous ou au dessus de la cote 650 cm. Cette cote correspond à une hauteur d'eau de 60 cm au droit de la ligne piézométrique n° 4, où le fond est à la cote 590 par rapport à l'échelle du barrage. En se reportant au profil de la ligne 4 (figure n°10), on lit que cette hauteur correspond à une largeur du plan d'eau de 88 m. C'est cette valeur que nous allons utiliser pour la transposition. Nous conserverons le fait que les vitesses sont comprises entre 14 et 54 mm/jr.

Nous avons donc cherché à comparer la morphologie de la retenue avec celle des autres sites. Pour ce faire, nous avons considéré les profils de sections de marigot qui ont été réalisés au droit des lignes piézométriques, en utilisant le fait que chacune des stations limnimétriques est proche d'une de ces lignes (voir carte n°5):

- la ligne 5 est proche de la station de Tilli,
- la ligne 4 est proche de celle du barrage,
- la ligne 2 est proche de celle de la digue filtrante.

On peut considérer que chacun de ces profils est peu différent de celui que l'on obtiendrait pour une section passant au droit des échelles limnimétriques. Ces profils sont présentés sur les figures 9 à 11.

2. La transposition

a. Cas de la digue filtrante

En se reportant au profil de la ligne piézométrique n°2 (figure n°9), on lit qu'une largeur du plan d'eau de 88 m correspond à une hauteur d'eau de 70 cm. Le fond étant à la cote 200 cm par rapport à l'échelle, nous considèrerons que la vitesse d'infiltration est constante

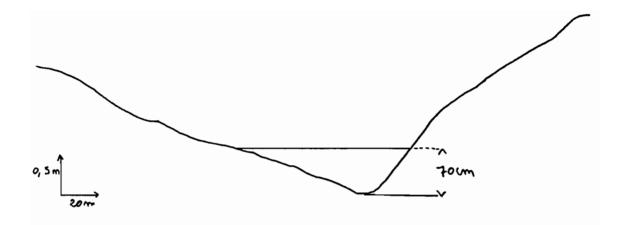


Figure n°9 : coupe transversale du bas-fond au droit de la ligne piézométrique n°2.

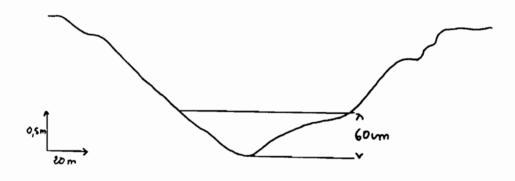


Figure n°10 : coupe transversale du bas-fond au droit de la ligne piézométrique n°4.

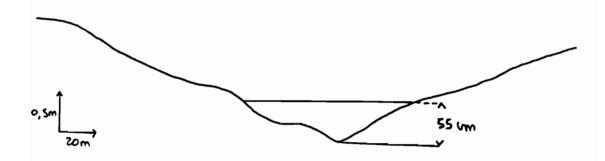


Figure n°11 : coupe transversale du bas-fond au droit de la ligne piézométrique n°5.

pour des cotes supérieures à 270 cm sur l'échelle associée à la digue filtrante. Cette constante vaut 14 mm/jr si la durée de submersion est inférieure à 504 heures, et 8 mm/jr sinon.

Il faut ensuite adapter les relations que l'on a pour le barrage pour des cotes moins élevées :

- si la durée de submersion est supérieure à 504 heures, alors :

v = 351,85-0,53*(cote+590-200)soit : v = 145,15-0,53*cote

- si la durée de submersion est iférieure à 504 heures, alors :

v = 404,3-0,6*(cote+590-200)v = 170,3-0,6*cote

b. Cas de la station de Tilli

Une largeur de 88 m du plan d'eau correspond à une hauteur d'eau de 55 cm (figure n°11), soit une cote de 465 cm sur l'échelle, si on considère que le fond est à la cote 410 dans la section de la ligne piézométrique n°5 par rapport à l'échelle de Tilli. La vitesse d'infiltration sera donc constante pour des cotes supérieures à 465 cm.

En ce qui concerne les cotes moins élevées, on a :

- si la durée de submersion est supérieure à 504 heures, alors :

$$v = 351,85-0,53*(cote+590-410)$$

 $v = 256.45-0,53*cote$

- si la durée de submersion est inférieure à 504 heures, alors

$$v = 404,3-0,6*(cote+590-410)$$

 $v = 296,3-0,6*cote$

3. Validité de la transposition

La validité de notre hypothèse de départ est discutable, en particulier parce que :

- le profil géologique varie nécessairement d'une ligne à l'autre,
- l'eau dans la retenue du barrage est stagnante, tandis qu'elle circule au niveau des autres sites, ce qui influence peut-être l'infiltration.

Une façon de vérifier la validité de notre transposition sera de confronter les valeurs que nous trouverons pour les lames d'eau infiltrées au droit des piézomètres avec les valeurs de la recharge de la nappe aquifère sous ces piézomètres.

La connaissance de ces diverses relations nous donnant les vitesses d'infiltration en fonction de la cote du plan d'eau va nous permettre de quantifier l'infiltration en différents points du marigot.

	·	

IV. CALCUL DE L'INFILTRATION

Afin de valider le modèle d'infiltration superficielle des eaux de crue dans le bas-fond de Gourga, nous allons commencer par estimer, localement, au niveau d'une série de piézomètres, les lames infiltrées.

A. La méthode

1. Les données

Nous disposons des relevés de hauteur d'eau pour les stations limnimétriques installées par l'O.R.S.T.O.M sur le marigot à Tilli, au barrage, et près de la digue filtrante. Ce sont les sites sur lesquels nous estimerons l'infiltration. Ces relevés ont été faits en 1988, 1989, 1990 et 1991, excepté pour la digue filtrante où le relevé n'a pas été fait en 1991.

Tous ces relevés ont été enregistrés grace à HYDROM, le logiciel de banque de données développé par le laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM. Un fichier HYDROM correspond à l'enregistrement des cotes instantanées en fonction du temps pour un site et pour une année, mois par mois.

Ce sont ces fichiers que nous allons utiliser.

2. Comment allons-nous procéder?

Une lame infiltrée se calcule pour une cote donnée en multipliant la vitesse d'infiltration à cette cote par la durée pendant laquelle cette cote est sous l'eau.

On peut calculer la lame d'eau qui s'infiltre sur une section, en multipliant la vitesse moyenne d'infiltration par la durée de submersion. Cette option a le mérite de permettre d'observer l'infiltration globalement par section de bas-fond. Comme nous connaissons déjà les relations liant vitesse et cote pour les différents sites d'études (voir II), il nous suffit de calculer les durées de submersion de chaque cote pour chaque site afin de pouvoir remonter à la lame d'eau infiltrée.

Les fichiers HYDROM donnent la chronique des hauteurs d'eau. Devant la masse de données à traiter, nous avons choisi de réaliser un programme informatique qui, à partir d'un fichier HYDROM donné, calcule la durée de submersion de chaque cote, et ce pour chaque crue. Ceci nous permettra d'énoncer des résultats du type : pendant la crue de telle date à telle date, la cote c a été submergée pendant n heures à la station X. Connaissant les relations liant vitesse et cote, nous pourrons, via la formulation de certaines hypothèses, réaliser un autre programme qui nous donnera une estimation de la hauteur d'eau qui s'est infiltrée entre la cote 0 et la cote c pendant cette crue.

B. Les programmes de calcul des durées de submersion et des lames infiltrées

1. Un exemple de fonctionnement de ces programmes

a. Calcul de durées de submersion

Imaginons qu'on veuille savoir pendant combien de temps les cotes 672 à 675 de la retenue du barrage de Gourga ont été submergées lors des trois premières crues du mois d'août 1989. Il suffit de faire tourner le programme en répondant de façon adéquate aux questions qui s'affichent sur l'écran. Ce qui s'affiche à l'écran lors du dialogue entre l'utilisateur et le programme est transcrit sur la figure n°12.

b. Calcul de lames infiltrées

Supposons qu'on veuille savoir quelle hauteur d'eau s'infiltre à la cote 599 de la retenue du barrage de Gourga lors des trois premières crues du mois d'août 1989. Là encore il suffit de faire tourner le programme en répondant aux questions posées. Les résultats sont transcrits sur la figure n°13.

2. Les programmes

Les listings des programmes sont en Annexe n°5. L'algorithme du programme de calcul des durées de submersion est fourni sur la figure n°14.

Il est clair que le programme de calcul des lames infiltrées reprend le programme de calcul des durées de submersion en le complétant. La fonction donnant la vitesse d'infiltration en fonction de la cote reprend les résultats dégagés dans la partie II. Nous avons pris comme hypothèse que la vitesse correspondant à une cote était valable sur toute la largeur du marigot, ce qui est probablement faux : on a vu que la vitesse était plus forte dans la partie centrale du marigot que sur ses côtés. Néanmoins, cette hypothèse a le mérite de nous donner une première estimation des lames infiltrées, cette estimation n'étant influencée que par la durée de submersion et non pas par les variations locales de l'infiltration liées à l'hétérogénéité des sols.

3. Les limites du programme

Le programme tourne correctement pour la plupart des fichiers HYDROM sur lesquels nous voulons travailler. Cependant, il présente quelques inconvénients, par exemple :

- il étudie les crues mois par mois, et ne permet pas la mesure de l'infiltration entre le dernier relevé du mois n et le premier relevé du mois n+1;
- il ne donne l'infiltration qu'au droit de la station limnimétrique;
- il "plante" si le fichier HYDROM contient autre chose que des chiffres; en effet, certains relevés sont suivis d'une lettre, qui code une situation particulière

Sur quel station desirez vous travailler ! tilli : barrage de Gourga, 1988,89,90 et 91 tilava: station de Tilli, 1988, 89 et 90 digfil: digue filtrante, 1987,88,89 et 90 Entrez votre choix : tilli Quelle année ? choix : 1989 Pour quel mois voulez-vous voir les resultats ? Entrez un chiffre compris entre 1 et 12 : 8 Pour quelles crues voulez-vous voir les durees de submersion ? Entrez le numero de la premiere crue : 1 Entrez le numero de la derniere crue : 3 Figure n°12 : exemple de calcul Pour quel intervalle de cotes voulez-vous voir ces durees ? de durées de submersion Entrez la cote la plus basse, en cm : 672 Entrez la cote la plus haute, en cm (Attention: ecart de 6 cm au plus): 675 Station: tilli Annee: 1989 Mois: 8 durees de submersion, en minutes 672 673 674 675 de : 10220 a: 41215 4915 4180 3800 3420 6045 de : 41215 a: 81700 6033 6031 6030 de : 81700 a : 140630 8010 8010 8010 8010 Sur quel station desirez-vous travailler ? tilli : barrage de Gourga, 1988,89,90 et 91 tilava: station de Tilli,1988,89 et 90 digfil: digue filtrante, 1987,88,89 et 90 Entrez votre choix : tilli Quelle année ? choix : 1989 Pour quel mois voulez-vous voir les resultats ? Entrez un chiffre compris entre 1 et 12 : 8 Figure n°13: exemple de calcul Pour quelles crues voulez-vous voir les lames infiltrees ? Entrez le numero de la premiere crue : 1 de lames infiltrées Entrez le numero de la derniere crue : 3 Pour quelle cote voulez-vous voir la lame ? Entrez cette cote, en cm : 599 Mois: 8 Station : tilli Annee: 89 lames en mm, durees en minutes Pour la cote 599 lame cumulee periode duree 41215 4915 46 10220 au : du : 102 du : 41215 au : 81700 6045

176

du:

81700 au :

140630

8010

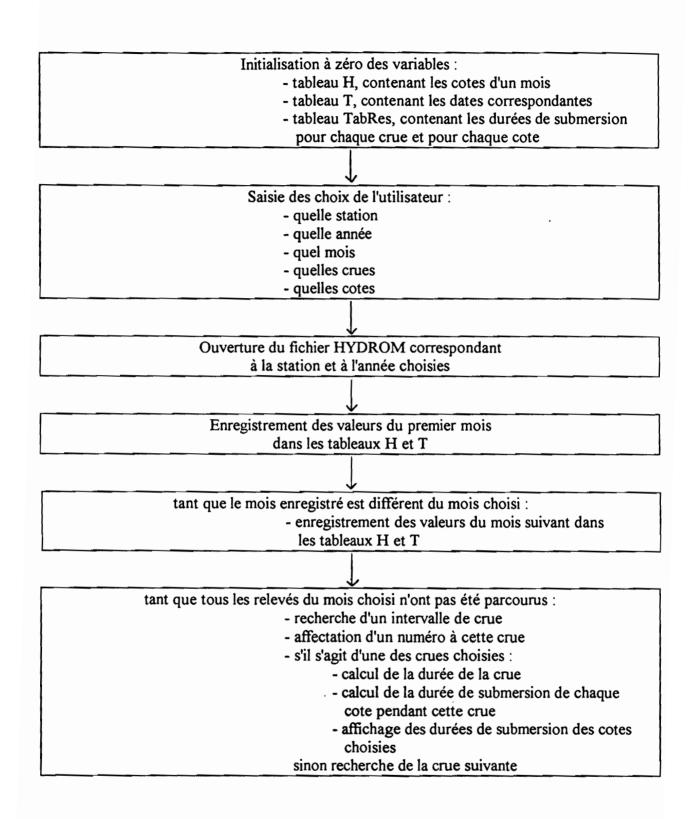


Figure n°14 : algorithme du programme de calcul des durées de submersion

(par exemple un relevé fait dans de mauvaises conditions). Ce problème n'a guère été rencontré qu'une fois (Tilava-1991), et nous y avons remédié en enlevant la lettre qui suivait le relevé;

- pour des raisons de place dans la mémoire, le programme ne peut pas étudier plus d'une trentaine de crues par mois.

Un problème délicat rencontré lors de l'utilisation du programme, est de savoir à quelle cote le marigot est "effectivement" en eau. Par exemple, les relevés concernant la station de Tilli ("Tilava") sont tous supérieurs à la cote 410 cm. On peut donc penser que le marigot est en eau dès que la cote est supérieure ou égale à 411. Sous cette hypothèse, il s'avère que la partie centrale du bas-fond est plus longtemps inondée à Tilli que dans la retenue du barrage! En fait cette erreur est due à l'interprétation des mesures des hauteurs d'eau : parfois le flotteur flotte, mais le relevé correspondant indique la présence d'une flaque d'eau, plutôt qu'un réel écoulement.

Pour remédier à ce problème, il faut considérer que le marigot est en eau a une cote supérieure de quelques cm à la cote la plus basse du relevé (dans le cas de Tilli, il semble que la cote minimale à retenir soit 418 cm), en examinant les courbes de tarage des stations hydrométriques.

C. Les résultats

Nous avons calculé les durées de submersion pour des largeurs de submersion approximativement semblables pour les trois sites étudiés. Les résultats sont reportés dans le tableau n°2, et sont repris sur les graphes n°9 et 10. L'analyse de ces deux graphes permet d'ores et déjà de faire quelques remarques.

1. Influence de l'existence d'un ouvrage

Que ce soit sur le graphe correspondant à une largeur de submersion petite (environ 18 m) ou plus grande (environ 45 m), on observe que la durée de submersion est plus importante en amont de la digue filtrante, et encore plus importante en amont du barrage qu'au niveau des autres stations. Il est clair que cette pérennisation a permis une infiltration plus importante au niveau de ces sites qu'au niveau des stations de Tilli ou de Gourga.

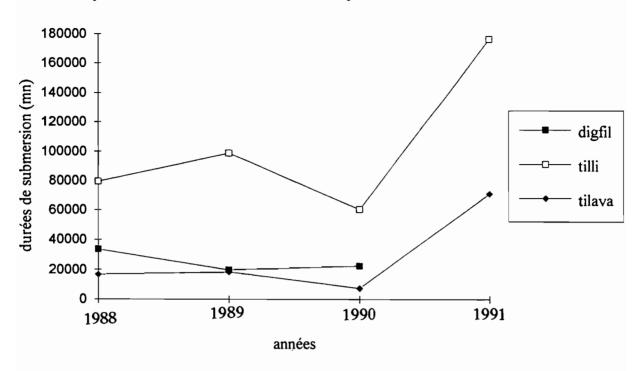
Les faibles durées de submersion de la station de Tilli sont certainement fortement accentuées par le fait que cette station se trouve en aval des deux ouvrages de rétention. Une station comme celle de Gourga, située entre la digue et le barrage, est submergée pendant des durées courtes, mais néanmoins plus longues qu'à Tilli. L'utilisation du programme de calcul des durées de submersion et des lames infiltrées permet d'évaluer cette différence.

2. <u>Influence de la gestion de la passe du barrage</u>

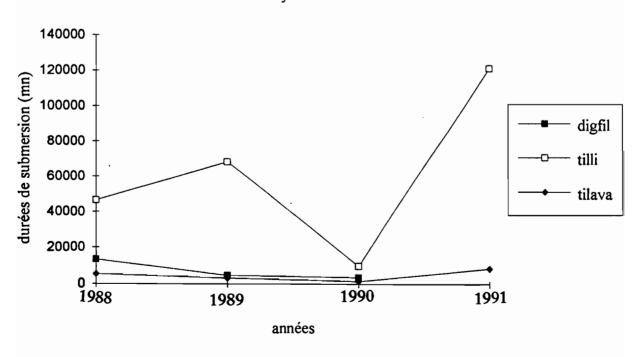
Il existe une passe au centre du barrage, qui permet de réguler la hauteur de l'eau dans la retenue. A l'origine, la hauteur de cette passe devait croître régulièrement au fur et à mesure de l'avancement de la saison humide, parallèlement à la croissance du riz cultivé en amont, de

	Tableau n°2 : durées de submersion, en minutes, pour les différents sites								
	pour de	submersion							
1988	digfil		tilli		tilava				
	à 211	à 236	à 599	à 636	à 419	à 435			
avril	1355	0	?	?	?	?	pluie le 25/04		
mai	?	?	?	?	?	?	pas de pluie		
juin	2971	719	?	?	?	?	pluie les 15,16	6 et 24/06	
juillet	3393	675	2160	0	350	0			
aout	19650	8679	29760	15840	10838	4227			
septembre	6280	3290	42420	30840	5350	1117			
octobre	?	?	4940	0	?	?	pluie le 4/10		
TOTAL	33649	13363	79280	46680	16538	5344			
1989	a 209	a 236	a 599	a 636	a 419	a 435			
mai	?	?	?	?	?	?	pluie après le	20/05	
juin	1767	110	5040	. 0	155	0	-		
juillet	2870	1192	13620	1560	1560	613			
aout	14470	3370	43300	43300	16138	2615			
septembre	491	0	36560	23360	325	0			
octobre	?	?	0		?	?	pluie au débu	t du mois	
TOTAL	19598	4672	98520	68220	18178	3228			
1990	a 209	a 236	a 599	a 636	a 419	a 435			
mai	1938	120	1080	0	0	0	pluie le 28/05		
juin	3273	660	5760	5040	1401	0	_		
juillet	11505	2216	19913	1229	3268	1326			
aout	4389	610	24455	3480	2160	180			
septembre	1123	0	9034	0	447	87			
octobre	?	?	?	?	?	?	pluie les 1 et	3/10	
TOTAL	22228	3606	60242	9749	7276	1593			
1991	a 209	a 236	a 599	a 636	a 419	a 435			
avril	?	?	?	?	?	?	pluie les 16 e	29/04	
mai	?	?	16030	16020	?	?	· _		
juin	?	?	34225				-		
juillet	?	?	35790						
aout	?	?	31945						
septembre	?	?	31415					-	
octobre	?	?	27075			?	pluie jusqu'au	14/10	
TOTAL	?	?		121596				1	

Graphe n°9 : durées de submersion dans la partie centrale du bas-fond



Graphe n°10 : durées de submersion dans la zone submergée par des crues moyennes



façon que le riz ait toujours la tête hors de l'eau. On acceptait donc dans cette optique de laisser s'échapper de l'eau au début de la saison, pour ne pas noyer le riz.

Cependant, les habitants de Bidi ont préféré voir la passe constamment fermée et la retenue pleine d'eau, car ils présumaient qu'ainsi la réalimentation de la nappe serait améliorée et qu'ils pouvaient espérer avoir de l'eau dans leurs puits pendant toute la saison sèche. De plus, la riziculture en amont de la retenue posait aux villageois un problème foncier. C'est pourquoi la chronique de la gestion des batardeaux est un reflet des confrontations des points de vue des uns et des autres...:

- -1988 : la passe se ferme progressivement, jusqu'à être pratiquement fermée début septembre,
- 1989 : début juillet, la passe est complètement fermée,
- 1990 : la passe est partiellement obstruée, puis en partie réouverte avant d'être à nouveau partiellement fermée début août,
- 1991 : la passe est pratiquement fermée.

On retrouve l'influence de cette gestion sur les graphes des durées de submersion :

- en 1991, le plan d'eau était important et a duré longtemps car la passe était fermée. Ce phénomène est accentué par le fait que l'année 1991 a été extrêmement pluvieuse.
- en 1990, les durées de submersion sont faibles : le fait que la passe n'ait jamais été complètement fermée a aggravé le fait que ce fut une année très sèche,
- en 1989, les pluies n'ont pas été particulièrement importantes, mais le fait que la passe ait été fermée en permanence a permis la pérennisation d'un plan d'eau important.

3. <u>Lames d'eau infiltrées au droit des piézomètres</u>

Nous avons calculé les durées de submersion, ainsi que les lames infiltrées, pour chaque site aux cotes correspondant au pied des piézomètres implantés dans le fond du marigot. Ces résultats nous serviront pour la suite, lorsque nous analyserons les relevés piézométriques.

Pour le calcul des durées de submersion, nous avons simplement utilisé le programme en entrant les cotes des pieds des piézomètres. Les résultats sont reportés dans le tableau n°3.

Pour le calcul des lames infiltrées, nous avons fait le calcul de deux façons :

- dans un premier temps, en considérant que la durée de submersion était toujours inférieure à 504 heures, ce qui est vrai dans le cas de la station de Tilli, mais l'est sûrement moins pour les stations du barrage et de la digue filtrante. Les vitesses d'infiltration utilisées dans le calcul sont celles données par les relations donnant la vitesse en fonction de la cote pour chaque site.
- dans un deuxième temps, nous avons voulu tester l'hypothèse selon laquelle les vitesses d'infiltration sont plus élevées dans le fond du marigot que sur ses bords. Nous avons donc considéré que la vitesse était de 54 mm/jr dans le fond et de 5 mm/jr sur les cotés.

Les résultats sont reportés dans les tableaux n°4 et 5.

Maintenant, grâce à l'étude de la piézométrie au niveau du bas-fond, nous allons pouvoir confronter les résultats d'une première estimation de l'infiltration à partir d'un bilan des durées de submersion et d'une évaluation de la vitesse superficielle d'infiltration à ceux d'une seconde estimation par l'étude du bilan hydrique au niveau de la nappe aquifère.

	Tableau n°3 : durées de submersion, en minutes, au droit des piézomètres								
		(Diefil)			(Tilli)			(Tilova)	
	ligne piéz	(Digfil)	1 n°2	liano piás	(Tilli) zométriqu	0.004	ligne piéz	(Tilava)	n°5
	2.0 (214)		2.2 (315)	4.0 (594)	4.1 (637)	4.2 (634)	5.0 (418)	5.1 (434)	5.2 (459
avril	1090	0	0						
mai									
juin	2970	278	0						
juillet	2455	0	0	3240	0	0	340	0	(
aout	10746	2591	0	32760		15864	11437	4464	(
septembre	6280	2195	0	42420	30280	32560	5730	1693	(
octobre				6900	0	0			
TOTAL	23541	5064	0	85320	46110	48424	17507	6157	(
1989	2.0	2.1	2.2	4.0	4.1	4.2	5.0	5.1	5.2
mai									
juin	1153	0	0	6480	0	0	300	0	(
juillet	2630	750	0	16080	1410	1605	1560	695	(
aout	11986	1235	0	43300	43300	43300	18419	3039	(
septembre	340	0	0	37920	22990	24160	390	0	(
octobre									
TOTAL	16109	1985	0	103780	67700	69065	20669	3734	
1000									
1990		2.1	2.2	4.0	4.1	4.2	5.0	5.1	5.2
mai	1845	0	0						
juin	2485								
juillet	9122							1374	
aout	3855	228	0			5237		201	
septembre	920	0	0	11120	0	0	485	100	
octobre									
TOTAL	18227	2106	0	69704	8225	10516	8827	1675	180
1991	2.0	2.1	2.2	4.0	4.1	4.2	5.0	5.1	5.2
avril							3.0	J	J.2
mai			Ī	16030	16020	16020			
juin				36655				951	27:
juillet				36390					
aout			1	31945					
septembre				31415					
octobre				28215					
TOTAL				180650				9556	143

		Tableau	n°4 : lam	es infiltré	es, en mi	m, au dro	it des pié	zomètre	S
		première	méthode d	e calcul (a	avec le pro	ogramme)			
		(Digfil)			(Tilli)			(Tilava)	
		zométrique		-	zométriqu		ligne piéz		
1988	2.0 (214)	2.1 (249)	2.2 (315)	4.0 (594)	4.1 (637)	4.2 (634)	5.0 (418)	5.1 (434)	5.2 (459)
avril									
mai									
juin	65	3	0						
juillet	54	0	0	101	0	0			
aout	206	28	0	573	180	180			
septembre	113	25	0	. 539	313	355	159	52	0
octobre				201	0	0			
TOTAL	438	56	0	1414	493	535	462	142	0
1989	2.0	2.1	2.2	4.0	4.1	4.2	5.0	5.1	5.2
mai	0			7.0	7.1	7.2	3.0	-	J.L
juin	32	0	0	198	0	0	7	0	0
juillet	49		0	404					
aout	300			399					
septembre	10			578					
octobre	10			370	223	243	33	-	-
TOTAL	391	23.5	0	1579	636	659	687	78	0
									1
1990	2.0	2.1	2.2	4.0	4.1	4.2	5.0	5.1	5.2
mai	42	0	0	45	0	0	3	0	0
juin	50	4	0	45	85	85			
juillet	220	13	0	691	12	14	87	26	2
aout	91	3	0	564	43	76	65		
septembre	25	0	0	307	0	0	14	2	
octobre									
TOTAL	428	20	0	1652	140	175	169	33	2
1991	2.0	2.1	2.2	4.0	4.1	4.2	5.0	5.1	5.2
avril	0	۷. ۱		7.0	7.1	7.2	3.0	J. 1	J.2
mai				135	135	135			
juin				664				16	3
juillet			-	373					
aout				259.5					
septembre				320					
octobre				530					
TOTAL				2281.5				175	16

		n°5 : lame			au droit d	les piézon	nètres		
		e méthode	de calcul						
		(Digfil)			(Tilli)			(Tilava)	
		ométrique		ligne piéz			ligne piéz		
1988	2.0 (214)	2.1 (249)	2.2 (315)	4.0 (594)	4.1 (637)	4.2 (634)	5.0 (418)	5.1 (434	5.2 (459)
avril	41	0	0						
mai									
juin	111	1	0						
juillet	92	0	0	121	0	0	13	0	0
aout	403	9	0	1228	55	55	429		0
septembre	235	8	0	1591	105	113	215	6	0
octobre				259	0	0			
TOTAL	882	18	0	3199	160	168	657	21	0
1989	2.0	2.1	2.2	4.0	4.1	4.2	5.0	5.1	5.2
mai	2.0	- . 1		1.0			3.5		
juin	43	0	0	243	0	0	11	0	0
juillet	98	3	0	603			58		
aout	449	4		1624					
septembre	13	0		1422					
octobre	13			1722			17	-	
TOTAL	603	7	0	3892	235	240	773	12	0
TOTAL	003		U	3032	255	240	710	'-	
1990	2.0	2.1	2.2	4.0	4.1	4.2	5.0	5.1	5.2
mai	69	0	0	54	0	0	0		
juin	93			148	14	14	94	C	0
juillet	342	5	0	989	4	5	132	5	1
aout	144			1005	11	18	86	1	0
septembre	34	0	0	417	0	0	18	1	0
octobre									
TOTAL	682	7	0	2613	29	37	330	7	1
1991	2.0	2.1	2.2	4.0	4.1	4.2	5.0	5.1	5.2
avril		ļ -:'							1
mai	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •			601	55	55			
juin		 		1374				2 3	3 1
juillet				1365					3
aout				1198					
septembre	-			1178					2 0
octobre				1058				1	7
TOTAL			-	6774				3 32	2 0 0 2 5

TROISIEME PARTIE

ETUDE DE LA PIEZOMETRIE SOUS LE BAS-FOND

I. LES OBSERVATIONS

A. Variations des niveaux piézométriques en fonction du temps

Les premiers piézomètres ont été implantés dans le marigot en juin 1987. C'est à cette date qu'ont commencé les relevés. Ceux-ci ont été réalisés à l'aide d'une sonde électrique lumineuse. Ils se sont poursuivis jusqu'au mois de décembre 1990.

Les courbes h = f(t) représentant les variations des niveaux piézométriques ont été tracées par les ingénieurs du B.R.G.M. ("Etude de la recharge naturelle et artificielle des nappes de bas-fonds de la région de Bidi" (1993)). Nous allons rapidement les commenter, ligne par ligne.

1. Ligne piézométrique n°1

Les pics des piézomètres 1.1 et 1.2 ont systématiquement un mois de retard sur le pic du piézomètre 1.0. La vitesse de décroissance des niveaux d'eau semble être la même pour ces trois piézomètres.

Les niveaux d'eau dans les piézomètres latéraux montent moins haut que dans le piézomètre central.

2. <u>Ligne piézométrique n°2</u>

Les piézomètres 2.3 et 2.4, respectivement à 6,66 et 8,01 mètres de profondeur, sont pratiquement toujours à sec.

La montée des niveaux piézométriques sur le site 2.2 a deux mois de retard par rapport au site 2.0. La décroissance des niveaux d'eau sous ces deux piézomètres est très rapide.

On note que le piézomètre 2.1 réagit en même temps que le 2.0.

Si le niveau d'eau monte aussi haut dans le piézomètre 2.1 que dans le piézomètre 2.0, il n'en est pas de même sur le site 2.2 où le niveau monte moins haut.

3. <u>Ligne piézométrique n°3</u>

Le piézomètre 3.5, creusé à 6,80 m de profondeur, est pratiquement toujours à sec.

Les piézomètres 3.2 et le 3.0 réagissent en même temps, même si on observe que la décroissance du niveau piézométrique est plus rapide sur le site3.0 que sur le 3.2. Le piézomètre 3.4 et le 3.6 ont des décalages de plus en plus important avec le site 3.0.

Le 3.1 a un mois de retard par rapport au 3.0. Le niveau piézométrique y décroît plus vite que dans le 3.0. Notons que ces courbes présentent quelques anomalies (fin 88 et au milieu de l'année 1990) qui, après analyse des relevés, semblent provenir d'une erreur de transcription des résultats.

Le niveau d'eau monte aussi haut dans les piézomètres 3.1 et 3.2 que dans le 3.0.

4. Ligne piézométrique n°4

Les piézomètres 4.0, 4.1 et 4.2 réagissent en même temps. Les réponses des piézomètres 4.3 et 4.4 sont un peu décalées; notons que leurs relevés sont à utiliser avec précaution car il s'agit en réalité de puits dans lesquels les villageois prélevaient régulièrement de l'eau (en faible quantité) pendant la période d'observation.

L'eau atteint la même hauteur dans les trois piézomètres 4.0, 4.1 et 4.2, et pratiquement dans le piézomètre 4.3.

5. <u>Ligne piézométrique n°5</u>

Les piézomètres 5.0, 5.1 et 5.2 réagissent simultanément. L'eau monte un peu moins haut sur le site 5.2 que sur les autres sites.

B. Visualisation des résultats

1. Profil en long

Nous avons réalisé une coupe longitudinale du bas fond sur laquelle nous avons reporté les cotes piézométriques à différentes dates (voir figure n°15) :

- le 28 août 1989, en pleine saison humide,
- le 16 août 1989, en fin de saison humide,
- le 25 décembre 1989, en saison sèche.

On observe qu'en pleine saison humide, sur plus de 300 mètres en amont du barrage, le niveau de la nappe est supérieur au niveau du sol. Le niveau de la retenue correspond sensiblement à la surface supérieure de la nappe. La vérification est facile, les piézomètres ayant été rattachés aux échelles du barrage. Notons qu'on n'observe pas d'affleurement de la nappe en amont de la digue filtrante.

2. Profils en travers

a. Comparaison des profils en amont et en aval du marigot

La figure n°16 retrace l'évolution du niveau piézométrique sous la ligne 2 pendant la saison humide 1989. On observe globalement un aspect en dôme.

De même la figure n°17 reprend les niveaux piézométriques sous la ligne 5 pendant la même période. On note que la forme en dôme est beaucoup moins marquée, excepté en pleine saison humide, le 24 août.



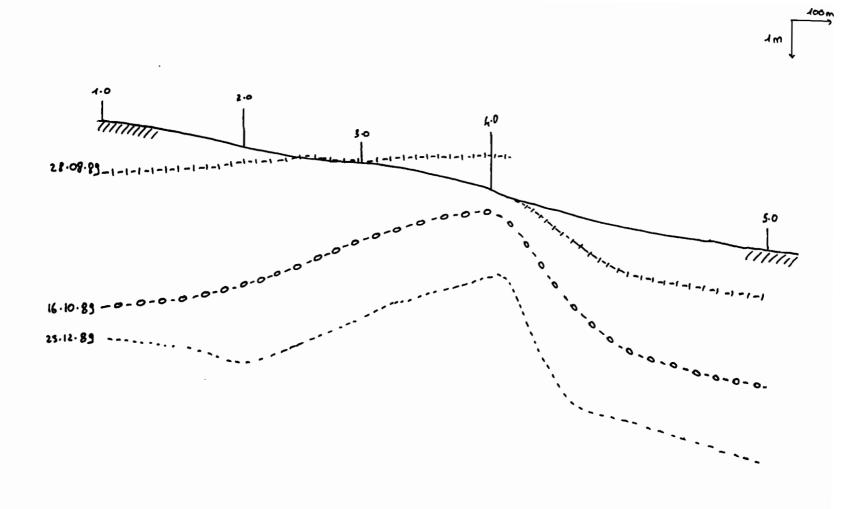
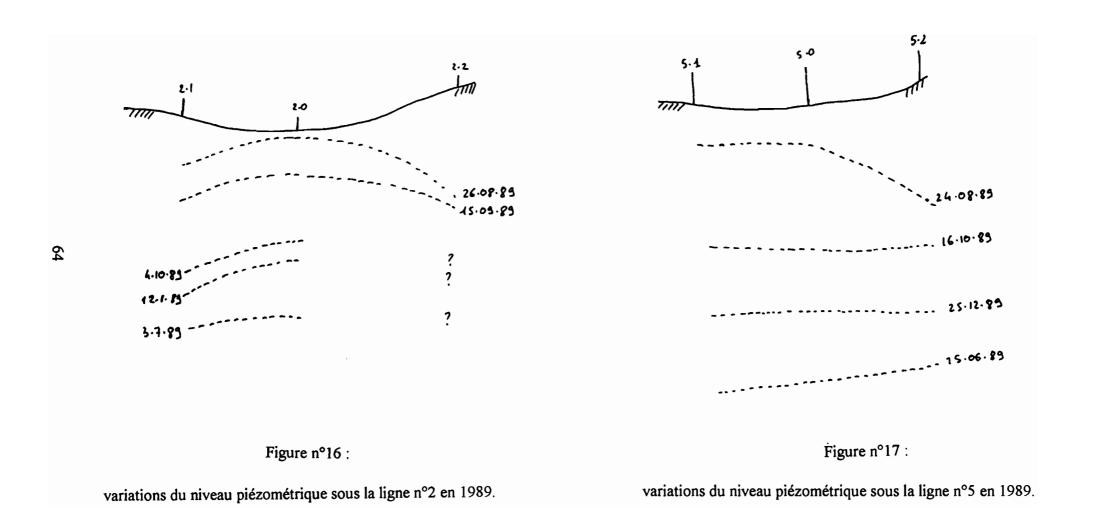


Figure n°15 : coupe longitudinale du bas-fond avec représentation des fluctuations du niveau piézométrique



b. En amont du barrage

La figure n°18 permet de voir simultanément le niveau de la retenue du barrage de Gourga et le niveau de la nappe. On observe que, si pour le piézomètre central, ces deux niveaux se confondent, il n'en est pas de même pour les piézomètres latéraux 4.1 et 4.2 (les puits 4.3 et 4.4 ne sont quant à eux jamais immergés). On note également une dissymétrie entre les comportements de 4.1 et 4.2, le niveau d'eau à l'intérieur de ce dernier semblant suivre plus fidèlement les variations du niveau d'eau dans la retenue que le niveau d'eau à l'intérieur de 4.1.

C. Submersion et variations des niveaux piézométriques

Nous avons calculé dans la partie II de ce mémoire les durées de submersion des différents piézomètres et les hauteurs d'eau infiltrées. On peut maintenant essayer de confronter les résultats de cette approche avec une estimation des volumes infiltrées réalisée à l'aide des relevés piézométriques, ce qui nous donnera vraisemblablement des informations intéressantes sur le fonctionnement du bas-fond.

L'étude du tableau n°6 appelle certaines observations.

Sous la ligne n°2 : le piézomètre 2.0 est submergé huit fois plus longtemps que le 2.1, et pourtant les variations de leurs niveaux se ressemblent beaucoup.

Sous la ligne n°4, c'est plutôt le phénomène contraire que l'on observe : les durées de submersion sont identiques, et pourtant les variation des niveaux sont très différentes les unes des autres. Il y a peu de fluctuations au droit du piézomètre central. Le piézomètre 4.1 se comporte d'une façon identique, à ceci près que son niveau descend beaucoup plus bas. Le niveau piézométrique sur le site 4.2 varie comme sur le site 4.0, mais avec une plus grande amplitude.

II. ELEMENTS D'INTERPRETATION

A. Les décalages temporels entre les réponses des piézomètres d'une même ligne

1. Cas de la ligne n°2

Le calcul des durées de submersion des différents piézomètres révèle que le piézomètre 2.2 n'est jamais immergé, contrairement au piézomètre 2.1 et a fortiori au 2.0. Il en résulte que l'eau qui se trouve au droit de ce piézomètre ne provient pas de l'infiltration verticale à partir de la surface (on néglige ce qui s'infiltre lors du ruissellement), mais de la circulation horizontale de l'eau depuis le centre du marigot. On peut donc penser que le piézomètre 2.2 réagit avec un décalage par rapport aux sites 2.1 et 2.0, car ces derniers sont largement alimentés en eau par l'infiltration verticale, contrairement au piézomètre 2.2.

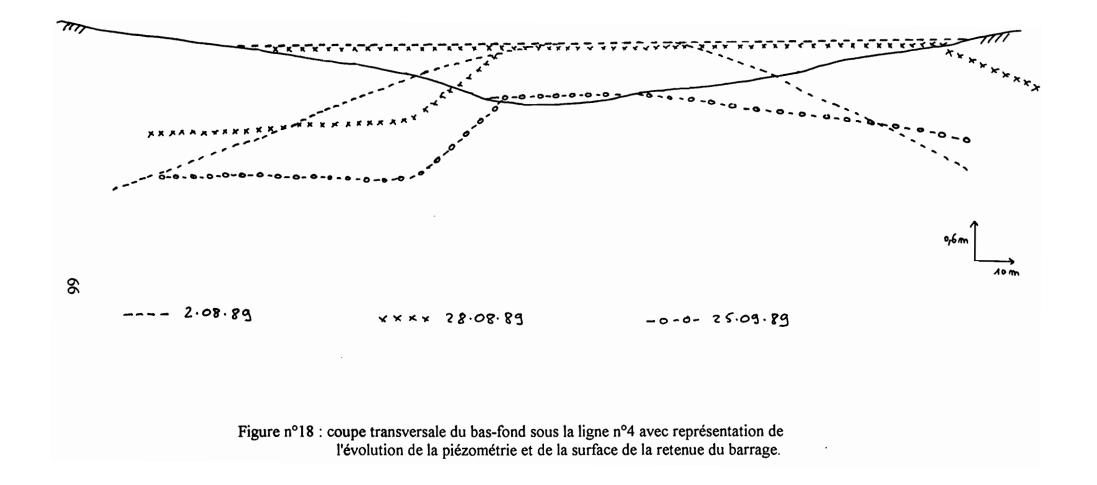


Tableau n°6 : variations de la piézométrie et submersion						
	des piézomètres					
Mois de juillet 1990	ligne piézométrique n°2					
piézomètre	2,1	2,0				
durée de submersion	1448 minutes	9122 minutes				
piézométrie : descente	3400 mm	3370 mm				
montée	5210 mm	5800 mm				
bilan	1810 mm en +	2430 mm en +				
delta ma	4080 mm	4330 mm				
Mois d'août 1989	ligne piézométrique n°4					
piézomètre	4,1	4,0	4,2			
durée de submersion	43300 minutes	43300 minutes	43300 minutes			
piézométrie : descente	860 mm	270 mm	1860 mm			
montée	250 mm	200 mm	1800 mm			
bilan	610 mm en -	70 mm en -	60mm en -			
delta ma	660 mm	130 mm	1770 mm			

2. Cas de la ligne n°5

Les piézomètres 5.0, 5.1 et 5.2 réagissent simultanément, alors que le calcul de leurs durées de submersion montre que le piézomètre 5.2, comme le 2.2, n'est pratiquement jamais immergé. Pourquoi alors n'observe-t-on pas un décalage entre le pic du piézomètre 5.0 et celui du 5.2 ? Pour répondre à cette question, il faut considérer la géologie du site.

Une campagne géophysique a été menée dans le bas-fond de Bidi. Des sondages électriques ont été réalisés afin de mieux connaître le sous-sol. Si les résultats concernant les couches supérieures sont délicats à interpréter du fait de leur grande hétérogénéité, on peut néanmoins situer précisément le substratum granitique. En effet, celui-ci est caractérisé par de fortes résistivités. La carte du substratum ainsi obtenue est la carte n°8; une coupe longitudinale est représentée sur la figure n°19.

On observe qu'au droit de la ligne piézométrique n°2, le substratum se trouve à environ 25 mètres de la surface topographique. Il est en revanche beaucoup plus proche (une dizaine de mètres) de la surface sous la ligne n°5. On peut penser que, sous la ligne n°5, les niveaux géologiques supérieurs, peu épais, sont rapidement saturés, ce qui rend la circulation horizontale de l'eau plus importante que sous la ligne n°2. On peut d'ailleurs rappeler ici l'existence d'une nappe profonde située dans les niveaux granitiques altérés; il est probable que cette nappe existe uniquement sous les lignes n° 1 et 2, là où le substratum est le plus profond. L'eau infiltrée sous la ligne n°2 serait alors drainée vers cette nappe, dont les niveaux sont observés dans un puits busé situé en aval de la digue filtrante, en rive gauche du marigot.

B. Les différences de vitesse de décroissance des niveaux piézométriques

1. Vitesses de décroissance et gradients de charge

On a vu que la décroissance du niveau piézométrique dans le piézomètre 3.1 était plus rapide que sur le site 3.0, et que cette décroissance était encore plus lente sur le 3.2.

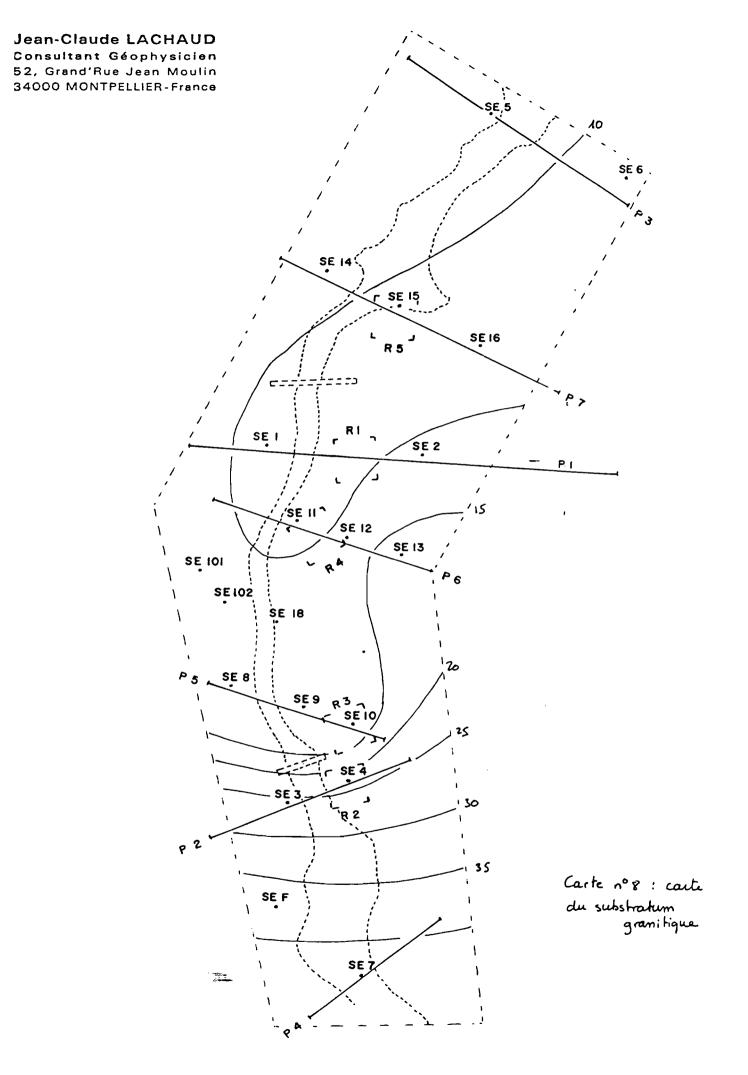
Pour aller plus loin et essayer de trouver une explication à ce phénomène, nous avons calculé les vitesses et les gradients de charge à des intervalles de temps et d'espace réguliers sous les lignes 2, 3 et 5, à partir de la date à laquelle les niveaux piézométriques ne font plus que diminuer (voir les tableaux n°7, 8 et 9). Il apparaît que, sous les lignes 2 et 3, il semble exister des couches caractérisées par de fortes vitesses de décroissance des hauteurs d'eau, qui seraient situées :

- sous la ligne 2 entre 4 et 6 mètres de profondeur, au droit de 2.1,
- sous la ligne 3 entre 2 et 4 mètres de profondeur, au droit de 3.1,

C'est à la hauteur de ces zones à forte vitesse de décroissance des hauteurs d'eau que l'on observe également les plus forts gradients hydrauliques latéraux.

On note également que cette couche n'existe pas sous les piézomètres 2.0 et 2.2, et 3.0 et 3.2, c'est-à-dire dans la zone centrale et sur la rive droite du bas-fond, ce qui pourrait correspondre à une dissymétrie du bas-fond. Cette "couche" ne semble pas exister non plus sous la ligne 5. Si on repense au fait que le substratum n'est qu'à une dizaine de mètres de la surface du sol dans cette partie du bas-fond, on peut supposer que cette couche est à cet endroit très proche de la surface, en tout cas à moins de trois mètres de profondeur, nos mesures de vitesse commençant à cette distance de la surface du sol.

Nous avons alors cherché à rapprocher ces résultats des quelques informations dont nous disposions sur la géologie du site.





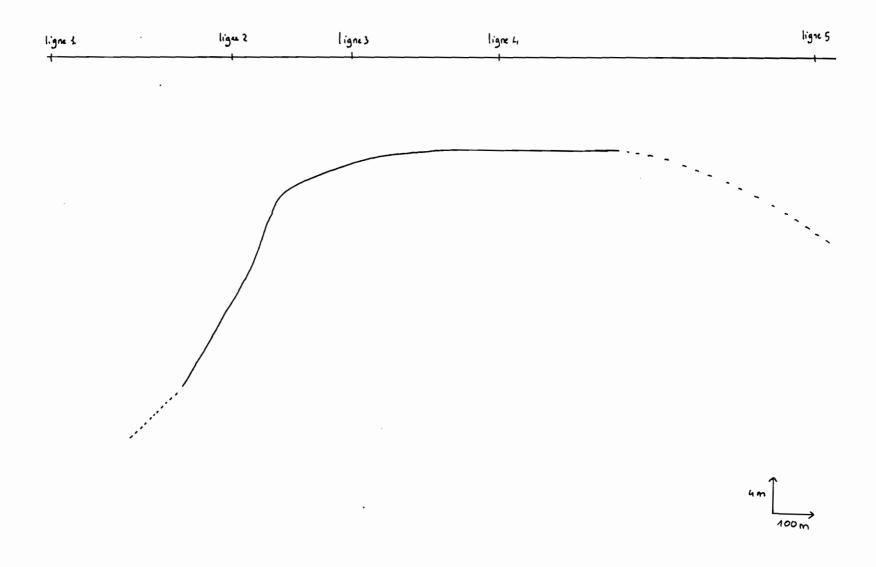


Figure n°19 : situation du substratum granitique sur une coupe longitudinale du bas-fond

		Tableau n°7 :	vitesses et	gradients de ch	arge sous la		
			ligne piézon	nétrique n°2			
1989)			1990			
	cote 1(date)	cote 2(date)	v (mm/jr)		cote1 (date)	cote2 (date)	v (mm/ir)
	2.25 (9/9)	3.15 (19/9)	90			4.01 (24/9)	98
	3.15 (19/9)	4.30 (1/10)	95		4.01 (24/9)	4.81 (4/10)	80
2,1	4.30 (1/10)	5.44 (16/10)	76	2,1	4.81 (4/10)	6.13 (15/10)	120
		6.62 (23/10)	168		6.13 (15/10)		87
	6.62 (23/10)		63		7.36 (29/10)		30
	7.70 (9/11)	8.20 (27/11)	27				
	, , , ,						
	1.6 (9/9)	2.51 (19/9)	91		2.03 (14/9)	3.00 (21/9)	138
	2.51 (19/9)	3.60 (1/10)	91		3.00 (21/9)	4.10 (4/10)	84
2,0	3.60 (1/10)	4.65 (16/10)	70	2,0	4.10 (4/10)	4.87 (15/10)	70
	4.65 (16/10)	5.70 (30/10)	75		4.87 (15/10)		50
		5.90 (6/11)	28				
2,2	3.4 (9/9)	3.7 (12/9)	100	2,2	3.94 (14/9)	4.05 (21/9)	15
				_			
date	piezo	cote lue	cote % sol	cote % 2,0	gradient		
12.09.89	2,1	2.54	2.042	1.631			
	2,0	1.95	0.944		0.02194888		
12.10.89	2,1	5.1	4.602	4.191			
	2,0	4.4	3.394		0.02546326		
16.10.89	2,1	5.44	4.942	4.531			
	2,0	4.65	3.644		0.02833866		
20.10.89	2,1	6.13	5.632	5.221			
	2,0	4.87	3.8694		0.04318211		
23.10.89	2,1	6.62	6.122	5.711			
	2,0	5.06	4.054		0.0529393		
26.10.89	2,1	6.95	6.452	6.041			
	2,0	5.24	4.234		0.05773163		
6.11.89	2,1	7.55	7.052	6.641			
	2,0	5.9	4.894		0.0558147		
légende		⊥ lue : avec la s			_		
				ı piézomètre, e			
				piézomètre 2	,0, en m		
	gradient : gra	adient de chan	ge				

		Tableau n°8	vitesses et	gradient	s de ch	arge sous la		
			ligne piézor			<u> </u>		
1989	_				1990			
	cote1 (date)	cote2 (date)	v (mm/jr)			cote1 (date)	cote2 (date)	v (mm/jr)
		2.50 (4/10)	57					
	2.50 (4/10)		106					
3,1	3.35 (12/10)		118	3,1		5.50 (27/9)	6.52 (29/10)	
	4.65 (23/10)		50			6.52 (29/10)	6.80 (17/12)	5
	5.70 (13/11)	6.70 (12/2)	34					
_	1.70 (25/9)	2.66 (20/10)	38					
3,0	2.66 (20/10)	3.66 (20/11)	32	3,0			4.08 (12/11)	
-	3.66 (20/11)	4.65 (8/1)	20			4.08 (12/11)	4.85 (17/12)	22
	4.65 (8/1)	5.63 (9/4)	11					
	4.05 (40(0)	0.04 (4(40)	- 50					
2.0	1.35 (12/9)	2.34 (1/10)	52 31	2 2		2.61 (14/0)	3.52 (15/10)	29
3,2	2.34 (1/10)	3.34 (2/11) 4.34 (1/1)	16	3,2		2.61 (14/9)	4.59 (17/12)	
	3.34 (2/11)	5.36 (23/4)	9			3.32 (13/10)	4.59 (17712)	10
	4.34 (1/1)	3.30 (23/4)				_		
date	piezo	cote lue	cote % sol	cote	% 3.0	gradient		
	3,1	1.42	0.965		0.659			
15.9.89	3,0	1.22						
	3,2	1.52			0.838	0.0046774		
	3,1	3.35	2.895		2.589	0.0260932		
12.10.89	3,0	2.33						
	3,2	2.7			2.018	0.0084409		
	3,1	5.58	5.125		4.819	0.0694624		
9.11.89	3,0	3.35	2.881					
	3,2	3.44	2.988		2.758	-0.0066129		
	3,1	6.22	5.765		5.459	0.0583513		
18.12.89	3,0	4.3	3.831					
	3,2	4.13			3.448			
	3,1	6.48	6.025		5.719	0.0515412		
15.1.89	3,0	4.75	4.281					
	3,2	4.5			3.818			
	3,1	6.78			6.019	0.0432975	<u> </u>	
19.2.89	3,0	5.28						
	3,2	4.95	4.498		4.268	-0.0291935	<u> </u>	
			L					
légende		lue : avec la						
		cote par rapp						
		cote par rapp		du piézo	metre 3	s,u, en m	-	
	gradient : gr	adient de cha	rge					

		Tableau n°9 :	radients de	charge sous la			
				nétrique n°5			
1989				1990	-		
	cote1 (date)	cote2 (date)	v (mm/jr)		cote1 (date)	cote2 (date)	
	3.05 (19/9)	4.03 (7/10)	54		5.03 (23/8)	6 (4/10)	23
5,1	4.03 (7/10)	5 (6/11)	33	5,1	6 (4/10)	6.98 (12/11)	25
	5 (6/11)	6 (18/12)	23		6.98 (12/11)	7.69 (17/12)	20
	6 (18/12)	7 (19/2)	15				
			10		T 10 (00 (0)	0.45 (45(40)	10
	3.10 (19/9)	4.10 (12/10)	43		5.10 (23/8)	6.15 (15/10)	19
5,0	4.10 (12/10)	5.15 (17/11)	29	5,0	6.15 (15/10)	7.15 (26/11)	13
	5.15 (17/11)	6.22 (1/1)	23		7.15 (26/11)	7.55 (17/12)	19
	6.22 (1/1)	7.26 (5/3)	16				
	0.05 (40(0)	E 00 (00(40)	31		6.03 (33 (08)	6.35 (7/9)	21
	3.95 (19/9)	5.02 (23/10)	25		6.03 (23/08)		20
5,2	5.02 (23/10)	6.10 (4/12)		5,2	6.37 (27/9)	6.73 (15/10)	23
	6.10 (4/12)	7.12 (5/2)	17		6.73 (15/10)	7.38 (12/11)	
	7.12 (5/2)	7.85 (26/3)	14		7.38 (12/11)	7.82 (3/12)	20
date	piezo	cote lue	cote % sol	cote % 5 (gradient		
date	5,1	3.4	2.9	2.62			
25.9.89	5,0	3.41	2.809		0.000		
	5,2	4.2		3.25	1 0.01473333		
	5,1	1.53		0.75			
24.8.89	5,0	1.5					
	5,2	3.67		2.72	1 0.06073333		
	5,1	4.65	4.15	3.87	9 -0.00166667	,	
26.10.89	5,0	4.53					
	5,2	5.07	4.57	4.12	1 0.0064		
	5,1	5.46	4.96	4.68	9 -0.001		
24.11.89	5,0	5.32	4.719				
	5,2	5.83		4.88			
	5,1	6.1		5.32	9 0.001	_	
25.12.89	5,0	5.9					
	5,2	6.42	5.92	5.47	1 0.00573333		
légende	cote et cote l	ue : avec la so	nde lumineu	ise, en m			
	cote % sol :	cote par rappor	t au pied du	piézomètre,	en m		
	cote % 5,0 :	cote par rappo	rt au pied du	piézomètre	5,0, en m		
		adient de charg					

2. Vitesse et profil géologique

Nous possédons des indications sur la géologie du bas-fond grâce :

- à des prélèvements de sols réalisés par un pédologue, essentiellement près de la ligne n°4,
- aux profils géologiques observés à l'intérieur des puits 4.3 et 4.4,
- aux résultats de la campagne géophysique.

Ce que nous avons pu dégager sur la géologie du bas-fond sous la ligne n°4 est repris sur la figure n°20.

Les observations concernant les vitesses et celles concernant la géologie du site sont dans une certaine mesure corrélables. En effet, on sait que la cuirassé latéritique est caractérisée par une forte perméabilité et un fort coefficient de stockage; elle est située (voir bloc-diagramme figure n°2) sous les sables limono-argileux et sur les niveaux argileux. Le profil géologique de la ligne n°4, assez précis, montre que l'argile est représentée dans d'assez importantes proportions dans ces niveaux supérieurs. On pourrait alors supposer qu'une vitesse de décroissance des niveaux piézométriques élevée correspond à la cuirasse, dans laquelle l'eau circule facilement, tant verticalement qu'horizontalement; cette circulation est beaucoup moins aisée dans les niveaux supérieurs et inférieurs du fait de la présence de l'argile.

Le fait que le niveau d'eau diminue plus vite dans le piézomètre 3.1 que sur les sites 3.0 et 3.2 a probablement la même cause géologique. La cuirasse existerait au droit du piézomètre 3.1 tandis qu'on ne la retrouverait pas sous le 3.0 ni sous le3.2 de l'autre côté du bas-fond. Il semblerait que l'on observe le même phénomène sous la ligne n°2 : la cuirasse est présente sous le 2.1 puis s'interrompt au centre du bas-fond, sous le 2.0, si bien qu'on n'y observe pas de zone à forte vitesse.

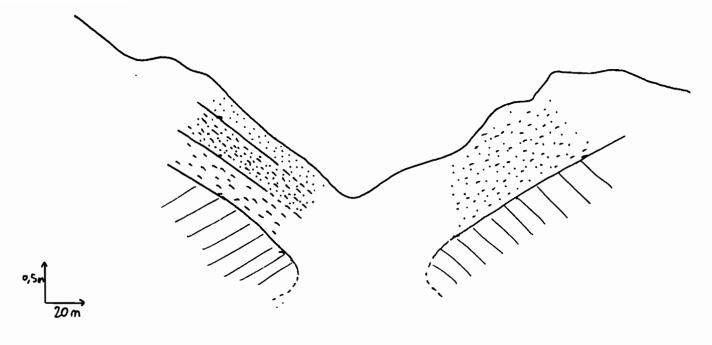
C. Relation submersion-variation des niveaux piézométriques

On retrouve ici aussi l'influence de la présence de la cuirasse latéritique : en effet, on peut penser que celle-ci favorise la circulation de l'eau sous le piézomètre 2.1, tant et si bien que même si celui-ci est submergé dix fois moins longtemps que le 2.0, la variation de son niveau d'eau suit de très près celle de 2.0.

En ce qui concerne la ligne n°4, on retrouve encore l'influence de la cuirasse. Le niveau d'eau de 4.1 descend plus bas que celui de 4.0 (phénomène que l'on observait également sur la figure n°18): la cuirasse très perméable facilite l'infiltration verticale et horizontale de l'eau, si bien que le niveau descend rapidement. De plus, l'étude de cette même coupe montre que l'infiltration directe à partir de la surface n'est pas très importante au droit du site 4.1, puisque le niveau de la nappe baisse alors que la retenue reste pleine. L'explication de ce dernier phénomène est donnée par la coupe géologique de la figure n°20: en effet, il existe un niveau argileux d'une cinquantaine de centimètres au droit du site 4.1. Ces deux phénomènes (faible infiltration à partir de la surface et circulation rapide de l'eau en hauteur et en largeur) concourrent à justifier la descente rapide du niveau piézométrique sur le site 4.1.

Le piézomètre 4.2 varie comme le 4.0, mais avec une amplitude six fois supérieure. On voit sur la coupe géologique de la figure n°20 qu'il n'y a pas de couche d'argile sous le site 4.2 : la cuirasse n'est surmontée que d'une couche de sable. L'infiltration à travers cette couche de sable est importante et rapide, et l'eau transite aussitôt à l'intérieur de la cuirasse.





sables

sables et limons

=== argile

1770 carapace

FIGURE 20 PROFIL GEOLOGIQUE SOUS LA LIGNE 4

III. MODELISATION DE L'INFILTRATION ET DE LA RECHARGE

Le but de cette modélisation est d'appréhender la dynamique de l'infiltration et de la circulation de l'eau dans le sol, en réalisant un bilan hydrique sur une colonne de sol. Ce bilan sera toujours réalisé au droit d'un piézomètre, car c'est là que nous disposons de données non seulement sur la nappe, bien sûr, mais aussi sur l'infiltration superficielle. Ceci nous permettra de confirmer ou d'infirmer les valeurs de l'infiltration fournies par le programme informatique réalisé dans la partie II.

A. Eléments pour une modélisation

1. Définitions (d'après HILLEL, 1974)

a. Teneur en eau volumique

$$\theta = \frac{V\omega}{Vt}$$

 θ est le volume d'eau contenu dans un certain volume de sol. La teneur en eau volumique est en général calculée sur un volume total de sol , plutôt que sur un volume de sol sec, ou un volume de particules.

A titre d'exemple, θ est de l'ordre de 40 à 50 % pour un sable saturé, et peut valoir jusqu'à 60 % pour une argile saturée.

b. Degré de saturation

$$\theta sat = \frac{V\omega}{Vpore}$$

 θ sat varie de 0 à 100 %, la valeur 100 % étant rarement atteinte, car il existe toujours un peu d'air piégé.

c. Potentiel de l'eau dans le sol

Une définition du potentiel de l'eau dans le sol peut être : " la quantité de travail par quantité unitaire d'eau pure requise pour transporter réversiblement et à température constante une quantité infinitésimale d'eau à partir d'un bassin d'eau pure à une altitude donnée et à la

pression athmosphérique jusqu'à l'eau du sol au point considéré" (ASLYNG et al., bulletin de la Société Internationale de la Science du Sol, 1963).

L'eau du sol est soumise à un certain nombre de champs de force, si bien que son potentiel total (\$\phi\$t) est la somme des contributions de différents facteurs :

$$\phi t = \phi g + \phi p + \phi o + ...$$

φp: potentiel de pression (ou potentiel matriciel),

φο: potentiel osmotique.

Les points de suspension indiquent que d'autres termes peuvent théoriquement intervenir.

On cherche ensuite une expression quantitative du potentiel de l'eau dans le sol. On peut par exemple l'exprimer en terme d'énergie par unité de poids, c'est-à-dire en terme de charge hydraulique :

$$H = Hg + Hp$$

avec Hg: charge potentielle gravitationnelle,

Hp: charge potentielle de pression.

Cette charge s'exprime usuellement en centimètres de colonne verticale d'eau. Comme elle peut atteindre des valeurs négatives extrêmement élevées (jusqu'à -100000 cm d'eau), on a pris l'habitude de donner le logarithme décimal de son opposée, que l'on a appelé le "pf". Ainsi, un pf de2 correspond à une charge hydraulique de -100 cm d'eau.

2. Etat du sol et infiltration

L'état du sol, et en particulier son degré de saturation, a une influence sur les relations sol-plantes et sur la circulation de l'eau dans le sol en général. On a ainsi pu définir des "paliers":

-pf = 4.2: c'est le point de flétrissement permanent, c'est-à-dire le point à partir duquel les plantes ne peuvent plus extraire l'eau matricielle du sol, et sont donc condamnées.

- pf = 2.5 : c'est le point à partir duquel l'écoulement gravitaire s'arrête. La teneur en eau correspondante s'appelle la capacité de rétention du sol.

La teneur en eau volumique θ varie en fonction du pf et en fonction de la nature du sol. Ces variations sont exposées sur la figure n°21.

Ainsi, pour saturer un mètre de sol sableux à pf = 2.5, en supposant que θ sat vaut 30%, il faudra :

$$1 \text{mètre} * (30\%-25\%) = 5 \text{ centimètres d'eau}.$$

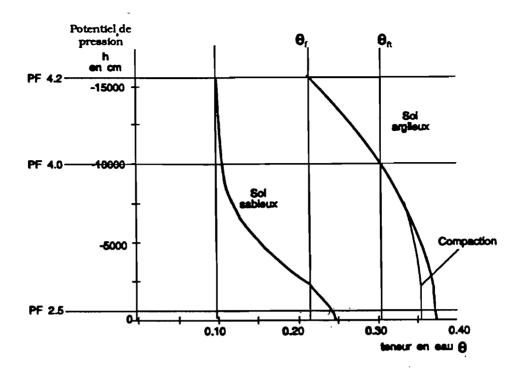


Figure n°21: potentiel de pression matricielle en fonction de la teneur en eau pour un sol sableux et un sol argileux.

B. Application au bas-fond de Bidi

1. Les données

LAMACHERE et al. (1993) ont retenu les valeurs suivantes en ce qui concerne le basfond de Bidi :

- pour les versants : à pf = 2.5, θ = 30 %;

à pf = 4.2, θ = 19 %;

- pour la zone centrale: à pf = 2.5, θ = 36 %;

à pf = 4.2, θ = 21 %.

D'autre part, nous avons déjà calculé en II (voir les tableaux n°7, 8 et 9) la vitesse à laquelle la nappe descend sous les différentes lignes piézomètriques en fin de saison humide. Ceci nous permettra, sous certaines hypothèses, d'évaluer la quantité d'eau qui s'infiltre en profondeur depuis une certaine tranche de sol pendant un certain laps de temps.

Le programme informatique que nous avons mis au point permet d'avoir une estimation de la quantité d'eau infiltrée depuis la surface au cours d'un certain nombre de crues.

2. Les hypothèses

Nous supposerons que les valeurs de θ à pf = 4.2 et à pf = 2.5 données par LAMACHERE et al. (1993) pour la zone centrale du bas-fond sont valables pour toute la zone centrale et sur toute la longueur du marigot.

Nous supposerons également que ces valeurs sont valables à toute profondeur, ce qui est déjà moins évident étant donné l'hétérogénéité du sous-sol.

Nous considèrerons que θ sat vaut 38 % dans la zone centrale. Cette valeur semble cohérente au vu de la valeur de θ à pf = 2.5 (36 %) et de l'allure de la courbe de la figure n°21.

Nous postulerons que la quantité d'eau infiltrée depuis la surface s'infiltre "rapidement", c'est-à-dire que nous ne nous pencherons pas sur les problèmes de circulation de l'eau dans la zone non-saturée et de ressuyage de cette tranche de sol.

C. Bilan hydrique sur une colonne

1. Méthode

Nous nous plaçons sur un laps de temps pendant laquelle la nappe ne fait que monter, laps de temps situé entre deux périodes pendant lesquelles la nappe ne fait que descendre. Nous vérifions ensuite à l'aide des relevés limnimétriques que le marigot est en eau entre les deux dates entre lesquelles la nappe monte, et qu'il est à sec avant et après. Nous sommes ainsi pratiquement sûrs que la montée de la nappe est uniquement due à l'eau infiltrée pendant ce laps de temps.

Nous vérifions ensuite que le niveau piézométrique reste toujours inférieur au niveau du sol.

Nous choisissons des périodes suffisamment longues pour que l'hypothèse formulée quant à la "rapidité" du transfert de l'eau dans la zone non-saturée soit plausible.

Enfin, nous négligeons l'éventuelle reprise par évaporation de l'eau qui se trouve à faible profondeur.

Les deux premières conditions font que la modélisation n'est pas possible sous la retenue du barrage : en effet, le niveau piézométrique dans la partie centrale du bas-fond est supérieur à celui du sol pendant une bonne partie de la saison humide, et la retenue n'est en général à sec qu'avant la saison des pluies ou après celle-ci.

Le bilan hydrique comprend plusieurs termes :

- d'un côté :
- l'eau qui s'infiltre depuis la surface,
- de l'autre :
- l'eau qui s'infiltre et rejoint la nappe,
- l'eau qui s'infiltre en profondeur vers la nappe profonde, quand elle existe.
- l'eau qui s'écoule sur les "côtés" de la colonne de sol,

2. Les termes du bilan

a. Volume infiltré depuis la surface (Vinf)

Pour le calculer, on fait tourner le programme réalisé dans la deuxième partie de l'étude. L'infiltration au droit de la ligne piézométrique n°2 est considérée comme semblable à celle au droit de la station limnimétrique de la digue filtrante ("Digfil"); il en est de même pour la ligne piézométrique n°5 et la station de Tilli ("Tilava").

La cote à laquelle on veut avoir la valeur de la lame infiltrée est celle du fond à l'endroit où le piézomètre est implanté.

On sélectionne les crues comprises à l'intérieur de notre intervalle de temps lors duquel la nappe ne fait que monter.

b. Volume rejoignant la nappe (Vnappe)

Certaines hypothèses sont nécessaires au calcul du volume d'eau rejoignant la nappe. Considérant que θ sat est égal à 38%, cette teneur en eau est celle du sol sous le toit de la nappe. On supposera dans nos calculs que, dans la tranche de sol immédiatement supérieure à la nappe, θ vaut 36%. Nous avons choisi cette valeur car elle correspond à la valeur de θ pour un pf de 2.5, c'est-à-dire lorsque l'écoulement gravitaire s'arrête.

Cette hypothèse n'est valable que si le sol a déjà été humecté au cours de la saison; dans le cas contraire, il faudrait revoir cette valeur à la baisse, sachant que θ à un pf de 4.2 vaut 21%.

c. Volume s'écoulant en profondeur et sur les côtés (Vprof)

On pourrait calculer séparément le volume d'eau qui s'infiltre en profondeur et celui qui s'écoule sur les côtés de la colonne de sol, mais il faudrait pour cela des données que nous ne possédons pas. En effet, si nous connaissions les valeurs de la perméabilité (K) et de la transmissivité (T) pour chaque couche du sol, nous pourrions, moyennant le calcul du gradient de charge existant entre notre colonne de sol et une colonne voisine, appliquer la loi de Darcy et connaître ainsi la valeur du flux hydrique entre ces deux colonnes. De la même façon, en connaissant le gradient vertical, nous pourrions calculer le flux hydrique vers les profondeurs, et, connaissant ces flux, nous pourrions calculer les volumes d'eau qui s'échappent latéralement de la colonne

Pour notre modélisation, nous avons repris les valeurs des vitesses de descente de la nappe sous les lignes piézométriques n°2 et n°5, données dans les tableaux n°7 et n°9. Nous faisons donc l'hypothèse que ces valeurs, mesurées en fin de saison humide, représentent les vitesses auxquelles l'eau s'écoule depuis la colonne de sol sur les côtés et vers les profondeurs. On augmentera la validité de cette hypothèse en vérifiant, lors des calculs, que les gradients de charge sont du même ordre de grandeur dans notre situation et dans la situation dans laquelle la mesure de vitesse avait été faite.

Nous considèrerons enfin que la descente de la nappe correspond à une baisse de la teneur en eau volumique du sol de 38 à 36% dans la tranche de sol au dessus de la nappe entre les deux positions limites sur l'intervalle de temps considéré.

3. Exemple de calcul

L'exemple choisi se situe en amont de la digue filtrante (ligne piézométrique n°2), au droit du piézomètre 2.0, vers la fin de la saison humide 1989.

Du 24 août au 7 septembre, le marigot à cet endroit était pratiquement à sec. Puis une crue s'est produite le 7 septembre, crue qui s'est traduite par une infiltration d'eau au droit du piézomètre 2.0. Après le 7 septembre, le marigot était à nouveau à sec.

L'étude des variations du niveau de la nappe au droit du piézomètre 2.0 révèle qu'entre le 6 et le 9 septembre celle-ci monte de -2 à -1.60 m, alors qu'avant le 6 et après le 9 elle ne fait que descendre.

Nous allons réaliser un bilan hydrique entre ces deux dates sur la colonne de sol entourant le piézomètre 2.0.

a. Calcul de Vinf

A l'aide du programme de calcul des lames infiltrées, on évalue à 10 mm la hauteur d'eau qui s'infiltre au droit de 2.0 pendant la crue du 7 septembre. Le marigot étant à sec avant et après, on considère que la montée de la nappe est uniquement due à cette infiltration.

b. Calcul de Vnappe

La nappe monte de 40 cm, ce qui signifie que 40 cm de sol se saturent. Comme nous l'avons expliqué précédemment, nous allons considérer que la teneur en eau volumique de cette tranche de sol de 40 cm d'épaisseur passe de 36 à 38 %.

Notons qu'il est cohérent de faire ici l'hypothèse que le sol est initialement à 36 % d'humidité, car on est en fin de saison humide, et le sol a déjà été humecté de nombreuses fois.

On peut maintenant calculer la hauteur de la lame d'eau qui a été nécessaire pour saturer cette tranche de sol :

$$400 \text{ mm} * (38 \% - 36 \%) = 8 \text{ mm}.$$

Il a fallu 8 mm d'eau.

c. Calcul de Vprof

En se reportant au tableau n°7, on voit qu'entre -1.6 et -2 m, la vitesse de descente de la nappe est de 91 mm/jr sous le piézomètre 2.0. Cette mesure ayant été faite à la fin de la saison humide 1989, il est cohérent d'utiliser ici cette valeur.

Notre période d'étude durant 3 jours (du 6 au 9 septembre), on calcule que, si la nappe n'avait pas été réalimentée depuis la surface, elle aurait baissé de (91 * 3 =) 273 mm.

En considérant comme nous l'avons déjà expliqué que la teneur en eau serait alors passée de 38 à 36 %, on obtient que la hauteur d'eau qui s'est effectivement échappée de la colonne de sol mesure (273*0.02 =) environ 5 mm.

d. Conclusion

D'un côté on observe que 10 mm d'eau s'infiltrent depuis la surface.

De l'autre on estime que la montée de la nappe correspond à une lame d'eau de 8 mm, et que parallèlement 5 mm d'eau s'infiltrent en profondeur ou s'écoulent depuis la colonne de sol vers les côtés.

On peut considérer que ce bilan est équilibré. Il est probable que les quelques millimètres d'eau qui "manquent" proviennent de l'égouttage de la tranche de sol comprise entre la surface du sol et la surface de la nappe, phénomène que nous avons négligé dans notre bilan.

4. Les résultats

Nous avons effectué plusieurs modélisations de l'infiltration en procédant de cette façon. Au droit des piézomètres 2.0 et 5.0, les bilans étaient toujours équilibrés, en général avec des écarts de l'ordre de 20%.

En revanche, certains bilans, réalisés au droit des piézomètres 5.1 et 5.2, ne le sont pas: en effet, on observe une montée de la nappe alors que l'infiltration depuis la surface est nulle, le piézomètre n'étant jamais submergé. Nous avions déjà noté que le niveau de la nappe montait sous les piézomètres 5.1 et 5.2 alors que le niveau de l'eau dans le marigot ne montait pratiquement jamais jusqu'à eux. Les résultats de ces bilans hydriques confirment donc l'hypothèse selon laquelle l'eau qui s'infiltre depuis le centre du bas-fond s'étale ensuite rapidement vers ses bords.

En effet, nous avons vu que les pertes ("Vprof") que nous calculons comprennent l'eau qui s'infiltre en profondeur, plus celle qui s'écoule vers l'amont, l'aval, ou les autres piézomètres de la ligne. On peut penser qu'au droit de la ligne n°5, sous laquelle le substratum granitique n'est qu'à une dizaine de mètres (voir figure n°19), la quantité d'eau qui s'infiltre en profondeur est certainement moins importante que dans le cas de la ligne n°2, sous laquelle le substratum est bien plus profond (au moins vingt mètres).

Certains expériences, travaux et calculs peuvent être envisagés afin de mieux appréhender la dynamique de la circulation de l'eau dans le sol.

D. Pour aller plus loin...

Nous avons réalisé un bilan "statique", ou bilan de stocks, sur une colonne de sol, en formulant certaines hypothèses. Il serait intéressant de réaliser certains travaux ou expériences pour perfectionner notre modélisation.

1. Travaux

L'installation de limnigraphes sur les piézomètres nous donnerait un enregistrement en continu du mouvement de la nappe. Ceci aurait l'interêt de permettre de réaliser des bilans hydriques en choisissant plus finement notre intervalle de temps. En effet, dans nos bilans, nous avons considéré les dates à partir desquelles le niveau piézométrique commençait à monter puis atteignait un maximum avant de redescendre. On ne sait pas a priori s'il n'a pas commencé à monter plus tôt, ou s'il n'est pas monté plus haut avant de redescendre.

Il serait également intéressant de surcreuser certains piézomètres qui, pour les années que nous avons étudiées, se sont révélés trop souvent à sec (c'est le cas notamment des 2.2, 5.3, 5.4...).

Enfin, l'installation de nouveaux piézomètres, voire de nouvelles lignes piézométriques, permettrait de passer de bilans hydriques sur une colonne de sol à des bilans hydriques sur une "bande" de sol en travers du bas-fond, voire par la suite à des bilans entre deux lignes. Il faudrait alors prévoir des appareils assez loin des rives du bas-fond, et assez profonds, pour pouvoir suivre l'évolution de la totalité de la nappe.

Notons que ces deux dernières opérations (surcreusement et creusement de nouveaux trous) permettraient, en outre, d'avoir de nouvelles informations sur la nature du sol et du sous-sol.

2. Expériences

a. Concernant la zone saturée.

Nous l'avons dit, la connaissance de la perméabilité K et de la transmissivité T permettrait d'appliquer la loi de Darcy qui donne le flux hydrique entre deux points en fonction du gradient de charge qui existe entre ces deux points. Etant donné l'hétérogénéité du sol sous le bas-fond, il faudrait connaître ces paramètres aux profondeurs correspondant aux différentes couches (argile latéritique, carapace, arène argileuse,...).

Une solution consisterait à réaliser des pompages d'essai à différentes profondeurs. Il faudrait, en fin de saison humide, suivre la descente de la nappe; puis, quand on estime que le toit de la nappe est légèrement au dessus du toit d'une couche, on réalise un essai de pompage, afin de déterminer les paramètres hydrodynamiques (transmissivité T et coefficient de stockage S) de cette couche.

On pourrait proposer la réalisation d'un traçage. En effet, nous avons vu que l'eau infiltrée dans la partie centrale du bas-fond s'étalait sur les côtés. En injectant un traceur dans un piézomètre comme le 5.0 ou le 2.0, on pourrait, par des prélèvements à pas de temps réguliers dans les autres piézomètres de la ligne, avoir une visualisation directe de la circulation latérale de l'eau dans le bas-fond. Notons cependant que, compte tenu des valeurs des flux verticaux et latéraux (le flux vertical étant de l'ordre d'une trentaine de fois le flux latéral moyen), on ne verrait peut-être pas grand-chose. C'est pourquoi il serait peut-être plus intéressant d'effectuer un traçage de surface, et d'analyser ensuite le descente du traceur. Cette expérience nous donnerait de plus des indications sur l'alimentation de la nappe profonde.

b. Concernant la zone non-saturée

Nous avons formulé, pour la réalisation de notre bilan hydrique, des hypothèses quant aux valeurs des teneurs en eau volumiques (θ). Pour être plus précis, il faudrait connaître l'évolution de θ en fonction de l'état du sol (en particulier de son pf) et de sa nature (plutôt argileuse ou plutôt sableuse). En clair, il serait utile de savoir comment varie θ depuis la nappe jusqu'à la surface du sol, en fonction de la nature des terrains rencontrés. Pour ce faire, il faudrait réaliser des mesures avec des tensiomètres et des sondes à neutrons.

Notons que ces expériences nous renseigneraient, en plus, sur une éventuelle reprise de l'eau infiltrée par évaporation dans la tranche superficielle (de 0 à -1 mètre), phénomène que nous n'avons pas pris en compte dans notre bilan.

Des essais Muntz réalisés en divers points du bas-fond nous renseigneraient sur les variations de la valeur de la perméabilité, superficielle cette fois, du sol à saturation (Ks).

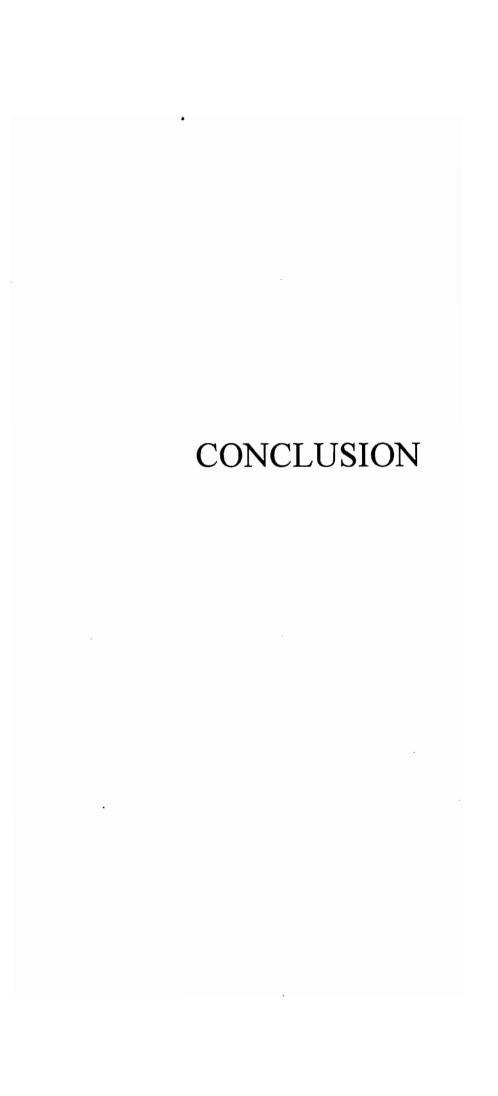
Plus délicats à mettre en oeuvre, mais également instructifs, le prélèvement d'échantillons de sol non remaniés que l'on enrobe de paraffine nous instruiraient sur la porosité du sol, et par là sur son coefficient de stockage (par exemple en faisant des essais de dessication-saturation)

3. Modélisation

Grâce à ces nouvelles informations, la modélisation de la circulation de l'eau dans le sol pourrait être d'une part affinée, d'autre part élargie.

Affinée, parce qu'on pourrait alors réaliser un bilan "dynamique", c'est-à-dire un bilan de flux, plutôt qu'un bilan de stock, forcément moins précis et moins instructif. Ce bilan serait de plus réalisé en considérant les caractéristiques propres à chaque couche.

Elargie, car on on serait en mesure de dépasser le cadre d'une colonne de sol pour passer à un bilan sur une "bande" de sol. On pourrait ainsi savoir, par exemple, quelle quantité infiltrée dans la partie centrale s'infiltre en profondeur, et quelle quantité s'étale sur les côtés.



		•
	·	

La première partie de cette étude a montré que, au moins au niveau de la retenue du barrage de Gourga, la vitesse d'infiltration superficielle est plus importante dans la partie centrale du bas-fond (jusqu'à plus de 57 mm/jour) que sur ses bords (parfois moins de 7 mm/jour). Une Analyse en Composantes Principales des différents paramètres qui nous paraissaient susceptibles de pouvoir expliquer cette vitesse nous a de plus appris qu'elle est très liée à l'état du sol, en particulier au fait que celui-ci ait été submergé pendant longtemps ou non. Nous avons alors esquissé un premier modèle de fonctionnement du bas-fond, qui consiste à faire jouer à la carapace ferrugineuse, située sous les sables limono-argileux, un rôle de réservoir principalement alimenté par la zone centrale du bas-fond car c'est là que cette couche de sable est la moins épaisse.

Nous avons ensuite transposé ces résultats en d'autres endroits du bas-fond, en amont et en aval du barrage de Gourga, en émettant une hypothèse supplémentaire, à savoir que le bas-fond se comporte de la même façon en ces différents endroits.

Possédant d'une part les relevés des hauteurs d'eau pour les stations limnimétriques installées sur le marigot, et d'autre part nos nouveaux résultats concernant la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, nous avons réalisé un programme de calcul permettant d'avoir une estimation des lames d'eau qui s'infiltrent. Ces premières évaluations nous ont permis de tirer quelques conclusions sur l'influence du barrage et de sa gestion sur la recharge de la nappe. On peut par exemple estimer que la durée de submersion du bas-fond dans la retenue du barrage est environ 3 fois et demie plus importante qu'en amont de la digue filtrante; ce rapport peut monter à cinq lorsque la passe centrale du barrage est fermée, permettant ainsi la pérennisation du plan d'eau en amont. On peut penser que le rapport des valeurs de l'infiltration sur ces deux sites est du même ordre de grandeur. Il apparaît également que le fait de fermer très tôt la passe, en 1989, a augmenté la durée de submersion dans la partie centrale du bas fond de 25 % par rapport à l'année précédente (lors de laquelle la passe avait été progressivement fermée), alors que pendant ce temps la pluviométrie n'augmentait que de 14 %. Il est donc clair que la gestion de la passe du barrage a une influence certaine sur la recharge.

La deuxième partie de cette étude s'est attachée à l'analyse de la piézométrie dans le bas-fond. Elle nous a permis de préciser notre premier modèle, principalement en mettant l'accent sur l'importance de la structure du sol du bas-fond.

Nous avons par exemple observé une augmentation de la circulation horizontale de l'eau lorsque le substratum granitique est proche de la surface (cas de la ligne piézométrique n°5). De même la présence d'un niveau argileux (comme il en existe un sous la rive gauche du bas-fond au niveau de la ligne n°4) entraîne une dissymétrie de l'infiltration d'une rive à l'autre. Enfin, il est apparu que les vitesses de descente des niveaux piézométriques sont globalement plus élevées sous les lignes n°1, 2 et 3 (jusqu'à 168 mm/jour) que sous les lignes n°4 et 5 (toujours moins de 60 mm/jour). Les descriptions des profils d'altération, bien que très incomplètes, et les sondages géophysiques, permettent de constater une augmentation de l'épaisseur d'altération de la ligne n°4 (environ 10 mètres) vers la ligne n°1 (une quarantaine de mètres). C'est d'ailleurs dans cette partie amont du marigot que la deuxième nappe du bas-fond, située plus en profondeur, a été observée. En effet, les relevés piézométriques au puits busé de

Gourga montrent qu'il existe une nappe profonde, dont le niveau supérieur fluctue entre -14 et -21 mètres. On en déduit qu'elle se trouve dans les granites altérés.

Dans un deuxième temps, la modélisation de l'infiltration et de la recharge que nous avons esquissée sur une colonne de sol a permis :

- d'une part de confirmer les valeurs de l'infiltration que nous avions estimées à l'aide du programme réalisé dans la deuxième partie de notre étude,
- d'autre part d'avoir un premier modèle, simple, de la circulation de l'eau dans le sol, modèle dans lequel on retrouve les premières hypothèses de fonctionnement.

La figure n°22 reprend ces différents résultats et présente un schéma global de fonctionnement du bas-fond sous la ligne n°4.

Certes, il reste encore des zones d'ombre, principalement à cause de lacunes d'observations. Dans la dernière partie de l'étude nous avons mis en évidence que certains travaux ou expériences permettraient, dans un premier temps, d'améliorer notre première modélisation, en précisant certaines hypothèses.

L'installation ou le surcreusement de piézomètres apporterait des informations sur le profil d'altération du bas-fond, et en particulier sur la présence ou l'absence de niveaux argileux, dont on a vu qu'ils influençaient l'infiltration. Cela nous renseignerait également sur la nappe profonde, présente au moins dans la partie amont du bief Gourga-Tilli, ce qui serait intéressant dans le cadre d'un modèle englobant les deux nappes. La pose de limnigraphes sur les piézomètres donnerait un enregistrement en continu des variations du niveau de la nappe, ou des nappes, ce qui nous permettrait de faire des bilans hydriques sur des intervalles de temps choisis plus finement, et donc d'obtenir des résultats plus précis.

Diverses expériences, telles que des pompages d'essais, nous renseigneraient sur les valeurs des paramètres hydrodynamiques de la zone saturée, éléments nécessaires à une modélisation de l'évolution de la nappe. En réalisant ces essais à des profondeurs régulièrement espacées, on obtiendrait des renseignements concernant chaque couche géologique, ce qui permettrait d'affiner encore le modèle.

Des essais Muntz et des mesures avec des tensiomètres nous donneraient des informations sur la zone non-saturée, en particulier sur la variation de la teneur en eau du sol en fonction de la profondeur. Ces essais serviraient par exemple à quantifier les phénomènes de ressuyage que nous avons négligés dans nos bilans hydriques.

Dans un deuxième temps, ces travaux complémentaires nous autoriseraient à tenter une modélisation plus large, sur une bande transversale du bas-fond, et nous permettraient d'appréhender à grande échelle les relations entre la dynamique de l'infiltration et la dynamique des aquifères.

Rive droite

		·	

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL J., LAMACHERE J.M., LIDON B., MOKADEM A., VANDRIEL W., 1993. Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. Rapport final d'un projet CORAF-R3S. Ouagadougou, Burkina Faso, CIEH, 335 p..

BOYER J.F., COCHONNEAU G., RAOUS P., décembre 1987. HYDROM, logiciel de banque de données hydrométriques. Aide au développement d'applications particulières. Laboratoire d'hydrologie, ORSTOM, 51 p..

CARLIER Ph., FAVIN H., LEGER Ch., 1992. Etude de la recharge naturelle et artificielle des nappes de bas-fonds de la région de Bidi, Burkina Faso. Orléans, BRGM. Rapport R34447 EAU 4S 92. 78 p..

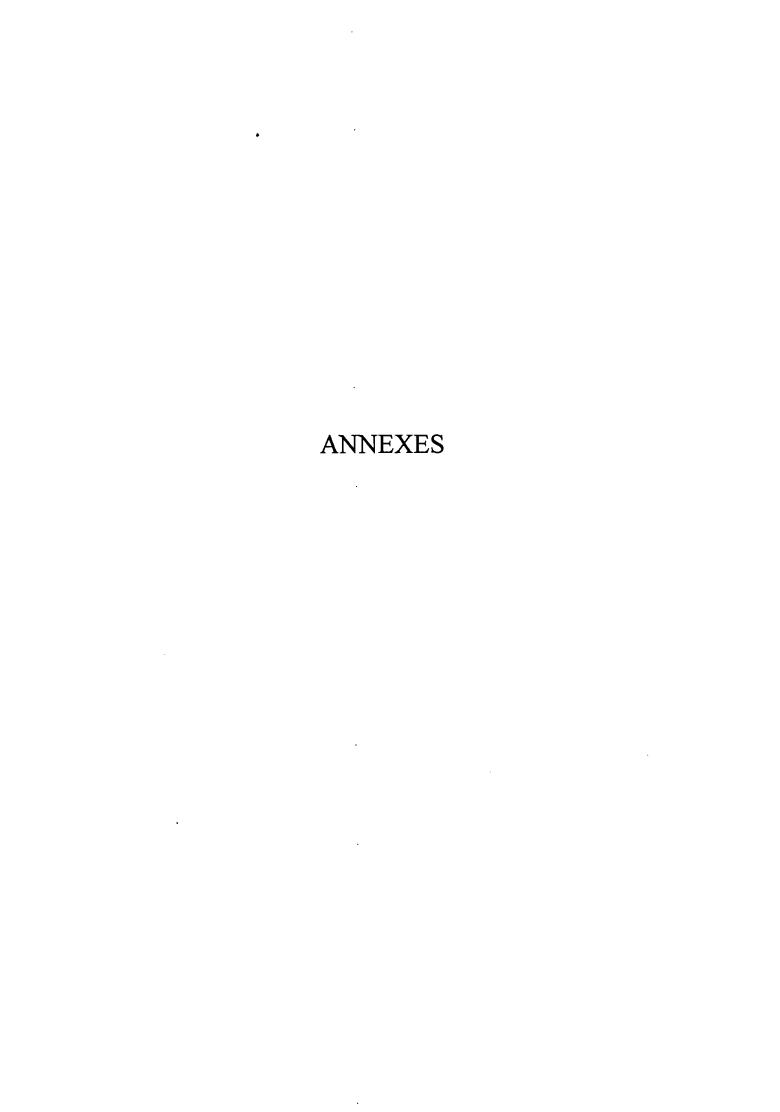
HILLEL D., 1974. L'eau et le sol, principes et processus physiques. Editions Vander, 288 p..

LAMACHERE J.M., MAIZE P., SERPANTIE G., ZOMBRE P.,1991. Un petit bas-fond en zone tropicale sèche; fonctionnement et aménagement. Burkina Faso, Yatenga, région de Bidi. Centre ORSTOM Ouagadougou. 24 p..

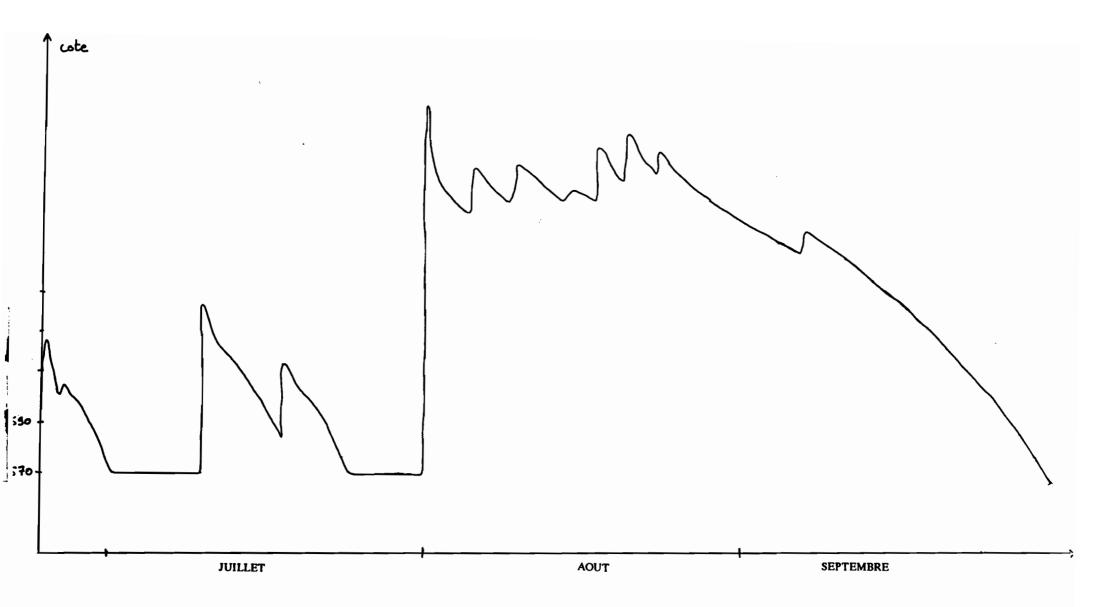
MILVILLE F., 1990. Contribution à l'étude des mécanismes de la recharge naturelle des aquifères par les pluies en climat semi-aride. Application au site expérimental de Barogo au Burkina Faso. Thèse Doct. Univ. Paris VI. 216 p..

PERON Y., ZALACAIN V., LACLAVERE G., 1975. Atlas de la Haute-Volta. Editions Jeune Afrique. 48 p..

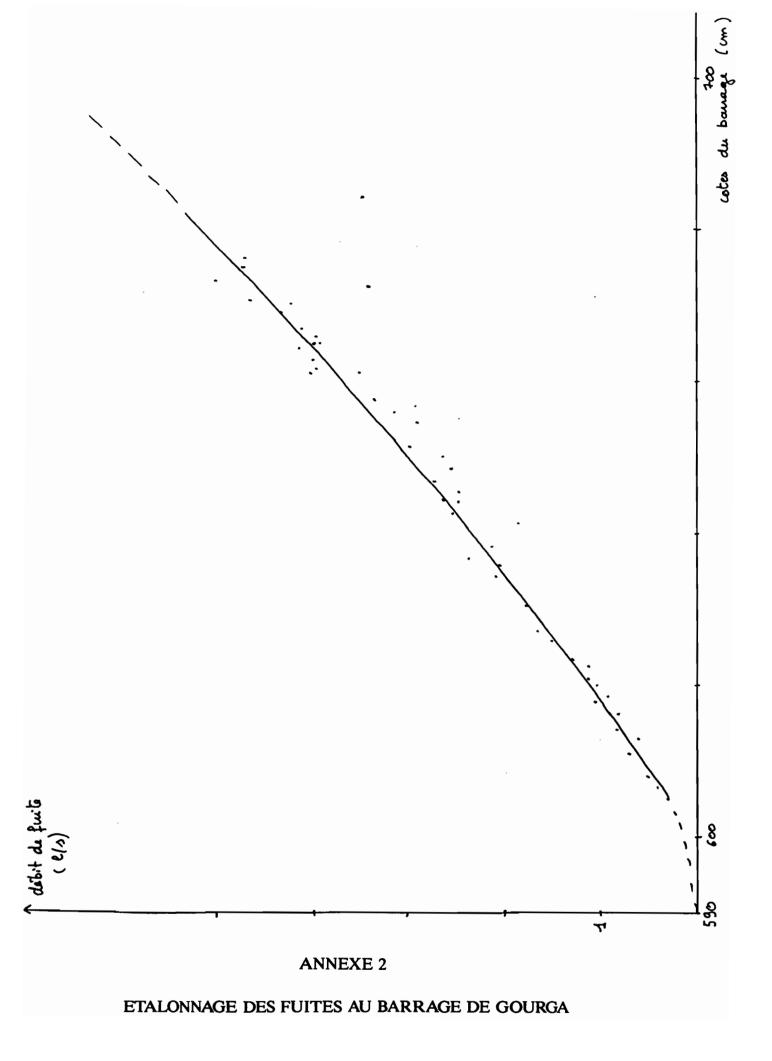
ZERBO L., juin 1991. Contribution à la caractérisation morphopédologique et structurale de trois bas-fonds de la province du Yatenga-Contraintes et aptitudes rizicoles. Mémoire de fin d'études, Université de Ouagadougou, Centre ORSTOM de Ouagadougou, 140 p..

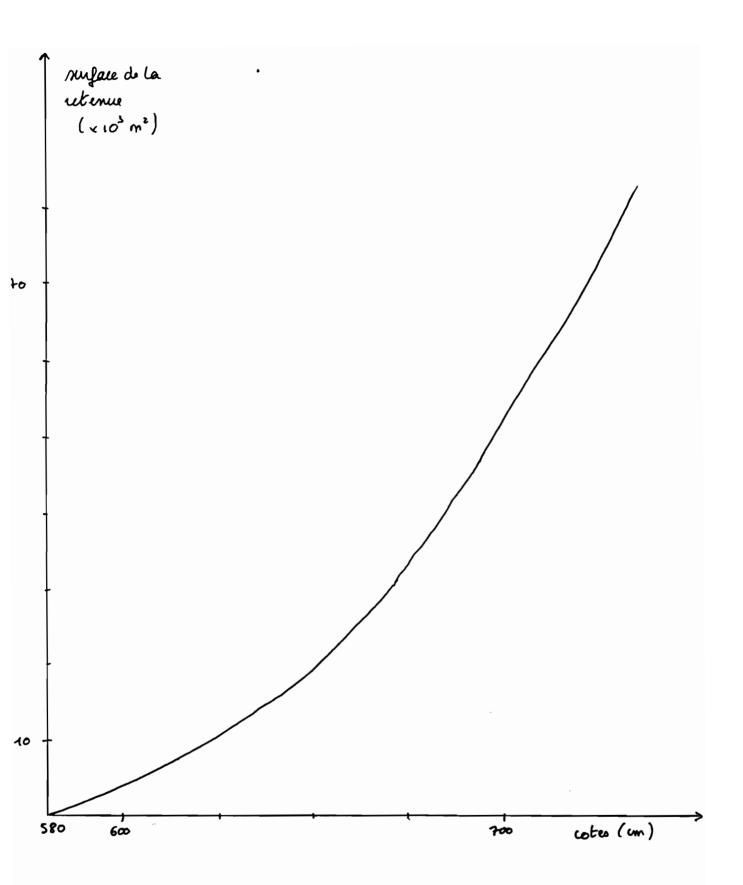


	·	



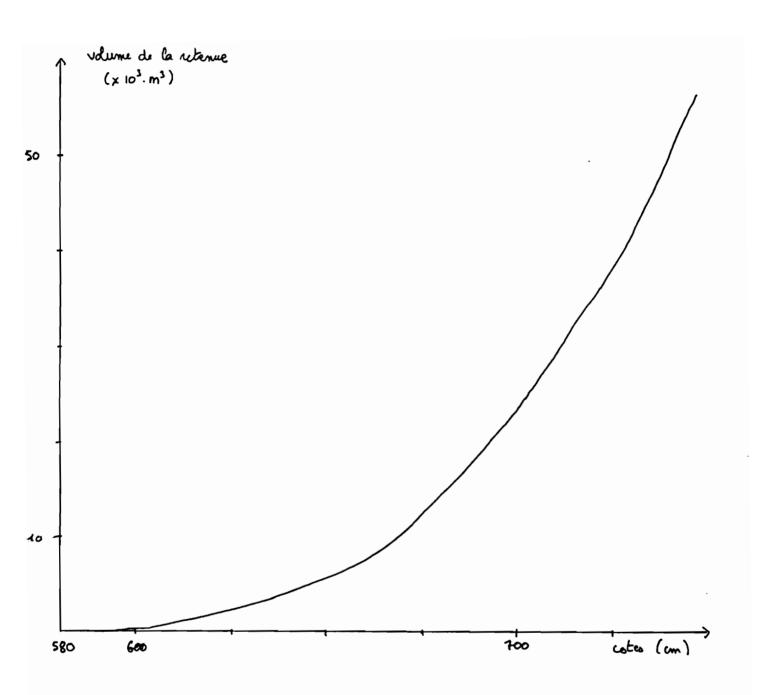
ANNEXE 1 GRAPHE DES RELEVES LIMNIMETRIQUES A LA RETENUE DU BARRAGE EN 1989





ANNEXE 3

RELATION COTES SURFACE DANS LA RETENUE DU BARRAGE



ANNEXE N°4

Calcul de l'évaporation à Gourga en 1988 et au début de la saison humide 1991

1. Les données et le problème

Nous disposons des mesures de l'évaporation au bac flottant sur la retenue du barrage de Gourga uniquement pour les années 1989, 1990 et pour la fin de la saison humide 1991, ce bac n'étant pas encore installé en 1988. En revanche, nous possédons les mesures de l'évaporation au bac Colorado à la station de Nayiri (voir carte n°5) pour ces quatre années. Nous avons donc cherché une corrélation entre ces deux types de mesures pour les trois années où nous les avions toutes les deux, afin d'en déduire une estimation de ce qu'aurait été l'évaporation au bac flottant en 1988 et au début de l'année 1990.

Le graphe page suivante représente les couples de valeurs de la moyenne décadaire de l'évaporation dans un repère "bac Colorado; bac flottant".

2. Recherche d'une corrélation

Nous avons éliminé deux points aberrants, ceux correspondant à la troisième décade d'août 1989 et à la troisième décade de Juillet 1990, car il est peu probable que l'évaporation soit à ce point différente à Gourga et à Nayiri.

Le coefficient de corrélation étant plutôt mauvais, nous avons distingué :

- le début de la saison humide, c'est-à-dire le mois de juillet et la première décade d'août (premier groupe de mesures),
- la fin de la saison humide, c'est-à-dire la troisième décade d'août et le mois de septembre (deuxième groupe de mesures).

Les points correspondant à la deuxième décade d'août ont été laissés de coté.

On obtient alors:

- pour le premier groupe: pente = 0.86, r = 0.89,
- pour le deuxième groupe : pente = 0.6, r = 0.96.

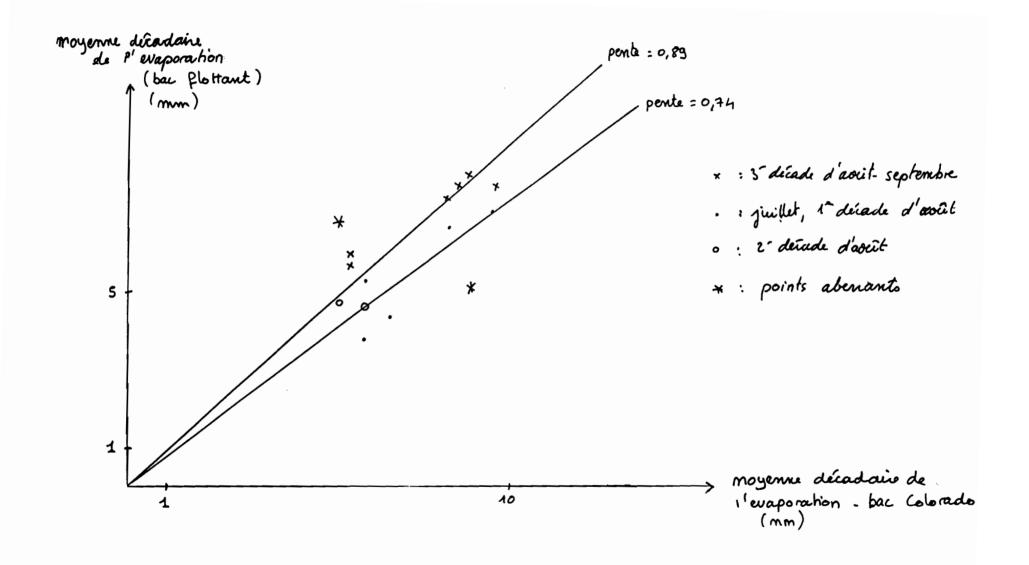
Cependant, le point (0;0) n'apparaît pas dans nos mesures, or il semble clair que les mesures aux deux bacs sont identiques en ce point. Nous l'avons donc ajouté aux deux groupes, avec une forte pondération (nous l'avons compté autant de fois que tous les autres points réunis). Alors :

- pour le premier groupe : pente = 0.74, r = 0.99,
- pour le deuxième groupe : pente = 0.89, r = 0.995.

Ce sont ces valeurs que nous avons retenues (voir le graphe page suivante).

3. Résultats

En utilisant ces équations, nous avons calculé les moyennes décadaires de ce qu'aurait été l'évaporation au bac flottant à Gourga en 1988 et en Juillet 1991.



CORRELATION ENTRE L EVAPORATION AU BAC FLOTTANT ET AU BAC COLORADO

ANNEXE N°5

Listings des programmes de calcul des durées de submersion et des lames infiltrées

Ces programmes sont réalisés en Pascal.

Les procédures "LecEnr" et "Ecrit" sont extraites du manuel d "aide au développement d'applications particulières" d'HYDROM.

```
program carcuic_dureco_demme. . . . ,
($N+)
uses crt;
(* declaration des variables globales *)
var
                                                  Programme de calcul des durées de submersion
Nomf1, Nomf : string[14];
Nomf2 : string[2];
 Sta : string[10];
 Cap, Cons, Mori, Omin, Omax : string[1];
 Zone : string[132];
 TabRes: array[1..50] of array[1..150] of single;
 Ok,G,I,J,K,L,M,An,Mo,Mochoisi,Nb,Un,Hmin,Hmax,compteur,Icdebut,Icfin: integer;
 NumCr,Cruedeb,Cruefin,Icmax,Fond : integer;
 Tmin,Tmax,Tdebut,Tfin,Cdebut,Cfin,Duree,Cotvu1,Cotvu2 : real;
 FicEnt : text;
 H: array[1..1929] of real;
 T: array[1..1929] of real;
 U : array[1..2] of string[4];
 o: array[1..1929] of string[1];
(* procedure de lecture et d'enregistrment des donnees d'un mois
   Elle enregistre dans diverses variables les paramètres d'un mois *)
procedure LecEnr;
begin
 Sta:=copy(Zone,1,10);
 Cap:=copy(Zone,11,1);
 val(copy(Zone, 12,4), An, Ok);
 val(copy(Zone, 16,2), Mo, Ok); val(copy(Zone, 18,4), Nb, Ok);
 val(copy(Zone, 22,1), Un, Ok); Cons:=copy(Zone, 23,1); Mori:=copy(Zone, 24,1);
 val(copy(Zone, 26,6), Tmin, Ok); val(copy(Zone, 32,5), Hmin, Ok);
 Omin:=copy(Zone, 37, 1);
 val(copy(Zone, 39,6), Tmax, Ok); val(copy(Zone, 45,5), Hmax, Ok);
 if length(Zone) > 50 then Omax:=copy(Zone,50,1) else Omax:= ' ';
 1:=0;J:=0;
 while J<Nb do
  begin
    readln(FicEnt,Zone);K:=1;
    for I:=1 to 10 do
      begin
        J:=J+1;
        if (J<=Nb) then
           begin
             val(copy(Zone,K,6),T[J],Ok);
             if(copy(Zone, K+6,1)) = '-' then val(copy(Zone, K+6,5), H[J], Ok)
             else val(copy(Zone,K+7,4),H[J],Ok);
             0[J]:=copy(Zone,K+11,1);K:=K+13;
           end:
      end;
   end;
 end:
 (* procedure d'ecriture
    Elle ne sert pas dans notre programme, mais elle peut être utile si on veut
    afficher de façon lisible sur l'écran le contenu d'un fichier *)
 procedure Ecrit;
 begin
  writeln; writeln;
```

```
write('capteur : ',Sta,'-',Cap,' annees : ',An,' mois : ',Mo);
 writeln(' cotes en : ',U[Un+1]);
 writeln; K:=0;
 for I:=1 to Nb do
  begin
    K:=K+1;
    if(K>4) then
      begin
         writeln(' ');K:=1;
      end;
     write(T[[]:8:0,H[[]:6:0,O[[])
  end;
  writeln;
 end;
(* procedure cherchant les intervalles sur lesquels la cote augmente puis
diminue ou ne fait qu'augmenter ou diminuer *)
procedure ChercheIntervalle;
begin
  if ( compteur=2 ) then begin
                            Cdebut:=H[1];
                            Tdebut:=T[1];
                            Cfin:=H[2];
                            Tfin:=T[2];
                            Icdebut:=1;
                           end
   else begin
          Cdebut:=Cfin;
          Tdebut:=Tfin;
          Cfin:=H[compteur];
          Tfin:=T[compteur];
          Icdebut:=compteur-1;
        end;
  if ((Cdebut > Cfin) and (Cdebut<>9999)) then
                       begin
                         Icmax:=Icdebut;
                         while( (H[compteur] < H[compteur-1])</pre>
                               and ( compteur<Nb+1 ) ) do
                               begin
                                 Cfin:=H[compteur];
                                 Tfin:=T[compteur];
                                 compteur:=compteur+1;
                                end;
                         Icfin:=compteur-1;
                       end;
  if ( ( Cdebut < Cfin ) and ( Cfin<>9999 ) ) then
                         begin
                            while ( (H[compteur] > H[compteur-1])
                                 and (compteur<Nb+1) ) do
                                  begin
                                     Cfin:=H[compteur];
                                     Tfin:=T[compteur];
                                     compteur:=compteur+1;
                                   end;
                             Icmax:=compteur-1;
                             while( (H[compteur] < H[compteur-1])</pre>
                                  and (compteur<Nb+1) ) do
                                    begin
                                      Cfin:=H[compteur];
                                      Tfin:=T[compteur];
                                      compteur:=compteur+1;
                                    end;
                            Icfin:=compteur-1;
                          end;
```

```
if ( Cdebut = Cfin ) then begin
                            compteur:=compteur+1;
                            Icfin:=Icdebut+1;
                            Icmax:=Icfin;
                          end;
if ( Cdebut = 9999 ) then compteur:=compteur+1;
end;
(* fonction calculant la duree comprise entre deux dates *)
function CalculeDuree(date1,date2 : real) : real;
var D, J1, J2, H1, H2, M1, M2 : real;
 var chaine1,chaine2 : string[6];
 var CJ1,CJ2,CH1,CH2,CM1,CM2 : string[2];
 var ko : integer;
 begin
  D:=0;
   str(date1:6:0, chaine1);
   str(date2:6:0,chaine2);
   if ( date1 > = 100000 ) then begin
                                val(copy(chaine1,1,2),J1,Ko);
                                val(copy(chaine1,3,2),H1,Ko);
                                val(copy(chaine1,5,2),M1,Ko);
                              end
       else begin
              val(copy(chaine1,1,2),J1,Ko);
              val(copy(chaine1,3,2),H1,Ko);
              val(copy(chaine1,5,2),M1,Ko);
            end;
   if ( date2 > = 100000 ) then begin
                                val(copy(chaine2,1,2),J2,Ko);
                                val(copy(chaine2,3,2),H2,Ko);
                                val(copy(chaine2,5,2),M2,Ko);
                              end
       else begin
              val(copy(chaine2,1,2),J2,Ko);
              val(copy(chaine2,3,2),H2,Ko);
              val(copy(chaine2,5,2),M2,Ko);
            end;
   if ( J1 <> J2 ) then D:=M2+H2*60+(J2-J1-1)*24*60+(24-H1-1)*60+(60-M1)
     else begin
            if ( H1<>H2 ) then D:=M2+(H2-H1-1)*60+(60-M1)
                else D:=M2-M1;
          end;
  calculeduree:=D:
 end;
(* procedure coupant chaque crue en tranches de 1 cm de hauteur, et
   calculant pour chaque cote la durée pendant laquelle elle est sous l'eau *)
procedure CoupeCrueTranches;
 var A,B,C,E,F,tempo,okk,Iprem,Ideuz : integer;
 var Dur, prem, deuz : real;
 var tempoch : string[6];
  A:=0;B:=0;C:=0;E:=0;F:=0;Iprem:=0;Ideuz:=0;prem:=0;deuz:=0;
  if( H[Icdebut] < H[Icmax] ) then</pre>
   begin
                                             (* partie croissante d'une crue *)
   for C:=Icdebut to Icmax-1 do
```

```
begin
    A:=C+1;
    B:=C;
    Dur:=0;
    while((H[A] >= H[B]) and (A <= Icmax)) do
           Dur:=Dur+CalculeDuree(T[A-1],T[A]);
           A:=A+1;
         end:
         tempo:=Round(H[C]);
         TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1] := TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1] + Dur;
 end; (* boucle for *)
 tempo:=Round(H[Icdebut]);
for E:=1 to (tempo-1-Fond+1) do begin
                       TabRes [NumCr] [E] :=TabRes [NumCr] [E]+
                               calculeduree(T[Icdebut],T[Icmax]);
for C:=Round(H[Icdebut]) to Round(H[Icmax-1]) do begin
     if ( TabRes[NumCr] [C-Fond+1]=0 ) then begin
                Iprem:=Round(C-Fond+0);
               prem:=TabRes[NumCr][!prem];
               Ideuz:=Round(C-Fond+1);
                   repeat Ideuz:=Ideuz+1 until TabRes[NumCr][Ideuz]<>0;
               deuz:=TabRes[NumCr] [Ideuz];
                  TabRes [NumCr] [C-Fond+1] :=deuz+1.0*
                        ( ((prem-deuz)/(Ideuz-Iprem))*(1) );
                                         end:
                                  end;
for C:=Icfin downto Icmax+1 do
 begin
   A:=C-1;
                            (* partie decroissante de la crue *)
   B:=C;
   Dur:=0;
    while((H[A] >= H[B]) and (A >= Icmax)) do
       Dur:=Dur+CalculeDuree(T[A],T[A+1]);
       A:=A-1;
     end;
     tempo:=Round(H[C]);
     TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1]:=TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1]+Dur;
     for F:=(Round(H[C+1])+1) to (Round(H[C])-1) do begin
               TabRes[NumCr] [F-Fond+1]:=TabRes[NumCr] [tempo-Fond+1]+
( TabRes [NumCr] [Round(H[C+1])-Fond+1]-TabRes [NumCr] [Round(H[C])-Fond+1] )/
                 (H[C]-H[C+1]) ) * ( H[C]-F );
                                                       end:
   end; (* boucle for *)
   tempo:=Round(H[Icfin]);
   for E:=1 to (tempo-1-Fond+1) do begin
              TabRes [NumCr] [E] :=TabRes [NumCr] [E]+
                  CalculeDuree( T[Icmax],T[Icfin]);
                                   end;
  end; (* boucle if *)
                                               (* decroissance seulement *)
  if ( H[Icdebut] = H[Icmax] ) then
  begin
  for C:=Icfin downto Icdebut+1 do
   begin
     A:=C-1;
     B:=C;
     Dur:=0;
     while ( ( H[A] >= H[B] ) and ( A >= Icdebut ) ) do
```

```
begin
          Dur:=Dur+CalculeDuree(T[A],T[A+1]);
          A:=A-1;
        end;
        tempo:=Round(H[C]);
        TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1] := TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1] +Dur;
     end;
     tempo:=Round(H[Icfin]);
     for E:=1 to (tempo-1-Fond+1) do begin
              TabRes[NumCr] [E]:=TabRes[NumCr] [E]+
                 calculeduree(T[Icdebut],T[Icfin]);
                                     end;
     for C:=Round(H[Icdebut+1]) downto Round(H[Icfin]) do begin
          if(TabRes[NumCr][C-Fond+1]=0) then begin
                  Iprem:=Round(C-Fond+2);
                  prem:=TabRes[NumCr][Iprem];
                  Ideuz:=Round(C-Fond+1);
                  repeat Ideuz:=Ideuz-1 until TabRes[NumCr][Ideuz]<>0;
                  deuz:=TabRes[NumCr][Ideuz];
                  TabRes[NumCr] [C-Fond+1] := prem + 1.0 *
            ( ((deuz-prem)/(Iprem-Ideuz))*(Iprem+Fond-1-c) );
                                        end;
                                  end;
   end;
end;
(* programme principal *)
begin
clrscr;
 (* initialisation des variables *)
U[1]:='cm';U[2]:='mm';
Mo:=0:
 for L:=1 to 50 do for M:=1 to 124 do TabRes[l][M]:=0;
 for L:=1 to 1929 do H[L]:=0;
 for L:=1 to 1929 do T[L]:=0;
 (* Menu permettant le choix de certaines observations par l'utilisateur *)
 writeln('Sur quel station desirez-vous travailler ? ');
 writeln;
 writeln(' tilli : barrage de Gourga, 1988,89,90 et 91');
 writeln(' tilava : station de Tilli,1988,89 et 90');
 writeln(' digfil : digue filtrante, 1987,88,89 et 90');
 writeln;
 write('
          Entrez votre choix : ');
 readln(Nomf1);
 writeln;
 write('Quelle année ? choix : 19');
 readln(Nomf2);
 writeln;
 Nomf:='a:'+Nomf1+Nomf2;
 assign(FicEnt,Nomf);
 reset(FicEnt);
 readln(FicEnt,Zone);
 if (Nomf1='tilli') then Fond:=570
  else if (Nomf1='tilava') then Fond:=400
       else if (Nomf1='digfil') then Fond:=200;
```

```
writeln('Pour quel mois voulez-vous voir les resultats ?');
write(' Entrez un chiffre compris entre 1 et 12 : ');
readln(Mochoisi);
writeln;
writeln('Pour quelles crues voulez-vous voir les durees de submersion ?');
write(' Entrez le numero de la premiere crue : ');
readln(Cruedeb);
write(' Entrez le numero de la derniere crue : ');
readln(Cruefin);
writeln;
writeln('Pour quel intervalle de cotes voulez-vous voir ces durees ? ');
write(' Entrez la cote la plus basse,en cm : ');
readln(Cotvu1);
writeln(' Entrez la cote la plus haute, en cm ');
write(' (Attention : ecart de 6 cm au plus) : ');
readln(Cotvu2);
writeln; writeln;
writeln('Station : ',Nomf1,'
                                Annee: 19',Nomf2,'
                                                         Mois : ', Mochoisi);
writeln;
writeln('durees de submersion, en minutes ');
writeln;
write('
                                1);
for G:=Round(Cotvu1) to Round(Cotvu2) do begin
                                         write(G:9);
                                         end;
writeln;
(* appel des différentes fonctions et procédures *)
LecEnr;
while (Mo<>Mochoisi) do begin
                   readln(FicEnt,Zone);
                   LecEnr;
                     end;
                   compteur:=2;
                   Duree:=0;
                   NumCr:=0;
while(compteur<Nb+1) do begin
                        Icdebut:=0;
                        Icmax:=0;
                        Icfin:=0;
                        ChercheIntervalle:
                        if( ( Cdebut<>9999 ) and ( Cfin<>9999 ) ) then begin
                        NumCr:=NumCr+1;
                        if (Mo=Mochoisi) then begin
                          if ( ( NumCr>=Cruedeb ) and (NumCr<=Cruefin) ) then
                        write('de : ',Tdebut:8:0,' a : ',Tfin:8:0);
                        CoupeCrueTranches;
                        for M:=Round(Cotvu1) to Round(Cotvu2) do
                                   write (' ',TabRes[Numcr][M-Fond+1]:8:0);
                        writeln;
                              end;
                                              end;
                                                                        end;
                      end;
end.
```

```
program calcule_lame_infiltree;
($N+)
                                             Pregramme de calcul des lames infiltrées
uses crt;
(* declaration des variables globales *)
Nomf1, Nomf : string[14];
Nomf2 : string[2];
Sta : string[10];
Cap,Cons,Mori,Omin,Omax : string[1];
Zone : string[132];
 TabRes: array[1..50] of array[1..160] of single;
Ok,G,I,J,K,L,M,An,Mo,Mochoisi,Nb,Un,Hmin,Hmax,compteur,Icdebut,Icfin: integer;
 NumCr, Cruedeb, Cruefin, Icmax, Fond, C1, C2, C3: integer;
 Tmin,Tmax,Tdebut,Tfin,Cdebut,Cfin,Duree,Cotvu1,Cotvu2,vitesse : real;
 lamemens1, lamemens2, lamemens3 : real;
 FicEnt : text;
 H : array[1..1929] of real;
 T : array[1..1929] of real;
 U : array[1..2] of string[4];
 o : array[1..1929] of string[1];
 Tablame: array[1..160] of single;
(* procedure de lecture et d'enregistrment des donnees d'un mois
   Elle enregistre dans diverses variables les paramètres d'un mois *)
procedure LecEnr;
begin
 Sta:=copy(Zone,1,10);
 Cap:=copy(Zone, 11, 1);
 val(copy(Zone, 12,4), An, 0k);
 val(copy(Zone, 16, 2), Mo, Ok); val(copy(Zone, 18, 4), Nb, Ok);
 val(copy(Zone,22,1),Un,0k);Cons:=copy(Zone,23,1);Mori:=copy(Zone,24,1);
 val(copy(Zone,26,6),Tmin,Ok);val(copy(Zone,32,5),Hmin,Ok);
 Omin:=copy(Zone, 37,1);
 val(copy(Zone,39,6),Tmax,Ok); val(copy(Zone,45,5),Hmax,Ok);
 if length(Zone) > 50 then Omax:=copy(Zone,50,1) else Omax:= ' ';
 I:=0;J:=0;
 while J<Nb do
  begin
    readln(FicEnt,Zone);K:=1;
    for I:=1 to 10 do
      begin
        J:=J+1:
        if (J<=Nb) then
           begin
             val(copy(Zone,K,6),T[J],Ok);
             if(copy(Zone,K+6,1)) = -- t then val(copy(Zone,K+6,5),H[J],Ok)
             else val(copy(Zone,K+7,4),H[J],Ok);
             O[J]:=copy(Zone,K+11,1);K:=K+13;
           end;
      end;
   end;
 end;
 (* procedure d'ecriture
    Elle ne sert pas dans notre programme, mais elle peut être utile si on veut
    afficher de façon lisible sur l'écran le contenu d'un fichier *)
```

procedure Ecrit;

```
begin
 writeln; writeln;
 write('capteur : ',Sta,'-',Cap,' annees : ',An,' mois : ',Mo);
 writeln(' cotes en : ',U[Un+1]);
 writeln; K:=0;
                                                        Ē
 for I:=1 to Nb do
  begin
     K:=K+1;
     if(K>4) then
       begin
         writeln(' ');K:=1;
     write(T[I]:8:0,H[I]:6:0,O[I])
   end;
  writeln;
 end:
(* procedure cherchant les intervalles sur lesquels la cote augmente puis
diminue ou ne fait qu'augmenter ou diminuer *)
procedure ChercheIntervalle:
begin
  if ( compteur=2 ) then begin
                            Cdebut:=H[1];
                            Tdebut:=T[1]:
                            Cfin:=H[2];
                            Tfin:=T[2];
                            Icdebut:=1;
                           end
   else begin
          Cdebut:=Cfin;
          Tdebut:=Tfin;
          Cfin:=H[compteur];
          Tfin:=T[compteur];
          Icdebut:=compteur-1;
        end;
  if ((Cdebut > Cfin) and (Cdebut<>9999)) then
                       begin
                         Icmax:=Icdebut;
                         while( (H[compteur] < H[compteur-1])
                               and ( compteur<Nb+1 ) ) do
                               begin
                                 Cfin:=H[compteur];
                                 Tfin:=T[compteur];
                                 compteur:=compteur+1;
                                end;
                         Icfin:=compteur-1;
                       end;
  if ( ( Cdebut < Cfin ) and ( Cfin<>9999 ) ) then
                         begin
                           while ( (H[compteur] > H[compteur-1])
                                 and (compteur<Nb+1) ) do
                                  begin
                                    Cfin:=H[compteur];
                                     Tfin:≃T[compteur];
                                     compteur:=compteur+1;
                                   end;
                            lcmax:=compteur-1;
                            while( (H[compteur] < H[compteur-1])</pre>
                                  and (compteur<Nb+1) ) do
                                   begin
                                      Cfin:=H[compteur];
                                      Tfin:=T[compteur];
                                      compteur:=compteur+1;
                                    end;
```

```
end;
if ( Cdebut = Cfin ) then begin
                            compteur:=compteur+1;
                            Icfin:=Icdebut+1;
                            Icmax:=Icfin;
                           end;
if ( Cdebut = 9999 ) then compteur:=compteur+1;
end:
(* fonction calculant la duree comprise entre deux dates *)
function CalculeDuree(date1,date2 : real) : real;
var D, J1, J2, H1, H2, M1, M2 : real;
 var chaine1,chaine2 : string[6];
 var CJ1,CJ2,CH1,CH2,CM1,CM2 : string[2];
 var ko : integer;
 begin
   D:=0;
   str(date1:6:0,chaine1);
   str(date2:6:0, chaine2);
   if ( date1 > = 100000 ) then begin
                                val(copy(chaine1,1,2),J1,Ko);
                                val(copy(chaine1,3,2),H1,Ko);
                                val(copy(chaine1,5,2),M1,Ko);
                              end
       else begin
              val(copy(chaine1,1,2),J1,Ko);
              val(copy(chaine1,3,2),H1,Ko);
              val(copy(chaine1,5,2),M1,Ko);
   if ( date2 > = 100000 ) then begin
                                val(copy(chaine2,1,2),J2,Ko);
                                val(copy(chaine2,3,2),H2,Ko);
                                val(copy(chaine2,5,2),M2,Ko);
       else begin
              val(copy(chaine2,1,2),J2,Ko);
              val(copy(chaine2,3,2),H2,Ko);
              val(copy(chaine2,5,2),M2,Ko);
            end:
   if ( J1\LeftrightarrowJ2 ) then D:=M2+H2*60+(J2-J1-1)*24*60+(24-H1-1)*60+(60-M1)
     else begin
            if ( H1<>H2 ) then D:=M2+(H2-H1-1)*60+(60-M1)
                else D:=M2-M1;
          end:
  calculeduree:=D;
 end:
(* procedure coupant chaque crue en tranches de 1 cm de hauteur, et
   calculant pour chaque cote la durée pendant laquelle elle est sous l'eau *)
procedure CoupeCrueTranches;
 var A,B,C,E,F,tempo,okk,Iprem,Ideuz : integer;
 var Dur, prem, deuz : real;
 var tempoch : string[6];
 begin
  A:=0;B:=0;C:=0;E:=0;F:=0;Iprem:=0;Ideuz:=0;prem:=0;deuz:=0;
  if( H[Icdebut] < H[Icmax] ) then</pre>
```

```
(* partie croissante d'une crue *)
 for C:=Icdebut to Icmax-1 do
 begin
   A:=C+1;
    B:=C;
    Dur:=0;
    while( ( H[A] >= H[B] ) and ( A <= Icmax ) ) do
           Dur:=Dur+CalculeDuree(T[A-1],T[A]);
           A:=A+1;
         end;
         tempo:=Round(H[C]);
         TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1]:=TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1]+Dur;
 end; (* boucle for *)
 tempo:=Round(H[Icdebut]);
for E:=1 to (tempo-1-Fond+1) do begin
                       TabRes[NumCr] [E]:=TabRes[NumCr] [E]+
                              calculeduree(T[Icdebut],T[Icmax]);
for C:=Round(H[Icdebut]) to Round(H[Icmax-1]) do begin
     if ( TabRes[NumCr] [C-Fond+1]=0 ) then begin
               Iprem:=Round(C-Fond+0);
               prem:=TabRes[NumCr][Iprem];
               Ideuz:=Round(C-Fond+1);
                  repeat Ideuz:=Ideuz+1 until TabRes[NumCr][Ideuz]<>0;
               deuz:=TabRes[NumCr][Ideuz];
                  TabRes[NumCr] [C-Fond+1] :=deuz+1.0*
                        ( ((prem-deuz)/(Ideuz-Iprem))*(1) );
                                         end;
                                  end;
for C:=Icfin downto Icmax+1 do
 begin
                            (* partie decroissante de la crue *)
   A:=C-1;
   B:=C;
   Dur:=0;
   while( (H[A] >= H[B] ) and ( A >= Icmax ) ) do
     begin
       Dur:=Dur+CalculeDuree(T[A],T[A+1]);
       A:=A-1;
     end;
     tempo:=Round(H[C]);
     TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1]:=TabRes [NumCr] [tempo-Fond+1]+Dur;
     for F:=(Round(H[C+1])+1) to (Round(H[C])-1) do begin
               TabRes (NumCr) [F-Fond+1]:=TabRes (NumCr) [tempo-Fond+1]+
( TabRes [NumCr] [Round(H[C+1])-Fond+1]-TabRes [NumCr] [Round(H[C])-Fond+1] )/
                 (H[C]-H[C+1]) ) * ( H[C]-F );
                                                       end:
  end; (* boucle for *)
  tempo:=Round(H[Icfin]);
   for E:=1 to (tempo-1-Fond+1) do begin
              TabRes (NumCr) [E] :=TabRes (NumCr) [E] +
                  CalculeDuree( T[Icmax],T[Icfin]);
                                   end:
  end; (* boucle if *)
                                             (* decroissance seulement *)
  if ( H[Icdebut] = H[Icmax] ) then
  begin
  for C:=Icfin downto Icdebut+1 do
   begin
     A:=C-1;
     B:=C;
```

```
White ( ( MIM) >- MID) ) and ( A >- 1000001 , , as
       begin
         Dur:=Dur+CalculeDuree(T[A],T[A+1]);
         A:=A-1;
       end;
       tempo:=Round(H[C]);
       TabRes[NumCr] [tempo-Fond+1]:=TabRes[NumCr] [tempo-Fond+1]+Dur;
    tempo:=Round(H[Icfin]);
    for E:=1 to (tempo-1-Fond+1) do begin
             TabRes [NumCr] [E] := TabRes [NumCr] [E] +
              calculeduree(T[Icdebut],T[Icfin]);
                                    end:
    for C:=Round(H[Icdebut+1]) downto Round(H[Icfin]) do begin
         if(TabRes[NumCr][C-Fond+1]=0) then begin
                 Iprem:=Round(C-Fond+2);
                 prem:=TabRes[NumCr][Iprem];
                 Ideuz:=Round(C-Fond+1);
                 repeat Ideuz:=Ideuz-1 until TabRes[NumCr][Ideuz]<>0;
                 deuz:=TabRes[NumCr][Ideuz];
                 TabRes[NumCr] [C-Fond+1] := prem + 1.0 *
           ( ((deuz-prem)/(Iprem-Ideuz))*(Iprem+Fond-1-c) );
                                       end:
                                 end:
  end;
end;
function EstimeVitesse (haut,dursub : real) : real;
var v : real;
begin
if (Nomf1='digfil') then begin
                           if (haut < 270) then v:=(170.3-0.6*haut)/(24*60)
                           else v:=14/(24*60);
                        end:
if (Nomf1='tilava') then begin
                           if (haut < 465) then v:=(296.3-0.6*haut)/(24*60)
                           else v:=14/(24*60);
                         end:
if (Nomf1='gourga') then begin
                           if (haut < 255) then v:=(170.3-0.6*haut)/(24*60)
                           else v:=14/(24*60);
                         end:
if (Nomf1='tilli' ) then begin
                           if (dursub=0) then begin
                              if (haut<650) then v:=(404.3-0.6*haut)/(24*60)
                               else v:=14/(24*60);
                                                end;
                           if (dursub=1) then begin
                             if (haut<650) then v:=(351.85-0.53*haut)/(24*60)
                             else v:=8/(24*60);
                                               end:
                         end;
EstimeVitesse :=v;
end:
procedure EstimeLame;
var P,Q,R : integer;
begin
 for P:=1 to 150 do Tablame[P]:=0;
 P:=0;
```

```
repeat P:=P+1 until TabRes[NumCr][P]=0;
 R:=P;
 repeat R:=R-1 until TabRes[NumCr][R]=TabRes[NumCr][1];
 if (R+1=P) then begin
                   vitesse:=Estimevitesse(Fond+R,0);
                   duree:=TabRes[NumCr][R]:
                   Tablame[R]:=duree*vitesse;
                  end;
 if (R+1<>P) then begin
                    vitesse:=Estimevitesse(Fond+P-1,0);
                   Tablame [P-1]:=vitesse*TabRes[NumCr] [P-1];
                   for Q:=(P-2) downto (R+1) do
                     begin
                        duree:=TabRes[NumCr] [Q-1]-TabRes[NumCr] [Q];
                        vitesse:=Estimevitesse(Fond+(2*Q-1)/2,0);
                       Tablame[Q]:=duree*vitesse:
                      end;
                  end;
 end;
procedure Calclametot;
var S : integer;
begin
  if (Tablame[Round(Cotvu1-Fond+1)]=0) then begin
                              S:=Round(Cotvu1-Fond+1):
                              repeat S:=S+1 until (Tablame[S]<>0) or (S=150);
                              if (S=150) then lamemens1:=lamemens1+0
                                         else begin
                              repeat lamemens1:=lamemens1+Tablame[S];
                                     S:=S+1:
                              until Tablame[S]=0;
                                             end
                              end
                            else begin
                                   S:=Round(Cotvu1-Fond+1);
                                   repeat lamemens1:=lamemens1+Tablame[S];
                                          S:=S+1;
                                   until Tablame[S]=0;
(* if (Tablame[C2-Fond+1]=0) then begin
                               S:=C2-Fond+1;
                               repeat S:=S+1 until (Tablame[S]<>0) or (S=150);
                               if (S=150) then lamemens2:=lamemens2+0
                                          else begin
                               repeat lamemens2:=lamemens2+Tablame[S];
                                      S:=S+1;
                               until Tablame[S]=0;
                                              end
                                end
                             else begin
                                    S:=C2-Fond+1;
                                    repeat lamemens2:=lamemens2+Tablame[S];
                                           S:=S+1;
                                    until Tablame[S]=0;
  if (Tablame[C3-Fond+1]=0) then begin
                               S:=C3-Fond+1;
                               repeat S:=S+1 until (Tablame[S] <> 0) or (S=150);
                               if (S=150) then lamemens3:=lamemens3+0
                                          else begin
                               repeat lamemens3:=lamemens3+Tablame[S];
                                      S:=S+1;
                               until Tablame[S]=0;
```

```
...
                            else begin
                                   S:=C3-Fond+1;
                                   repeat lamemens3:=lamemens3+Tablame[S];
                                          S:=S+1;
                                   until Tablame[S]=0;
                                 end:
end;
(* programme principal *)
begin
clrscr;
 (* initialisation des variables *)
U[1]:='cm';U[2]:='mm';
 Mo:=0;
 vitesse:=0;duree:=0;
 for L:=1 to 50 do for M:=1 to 160 do TabRes[l][M]:=0;
 for L:=1 to 1929 do H[L]:=0:
 for L:=1 to 1929 do T[L]:=0;
 for L:=1 to 160 do Tablame[L]:=0;
 (* Menu *)
 writeln('Sur quel station desirez-vous travailler ? ');
 writeln;
 writeln(' tilli : barrage de Gourga, 1988,89,90 et 91');
 writeln(' tilava : station de Tilli,1988,89 et 90');
 writeln(' digfil : digue filtrante, 1987,88,89 et 90');
 writeln:
 write('
          Entrez votre choix : ');
 readln(Nomf1);
 writeln:
 write('Quelle année ? choix : 19');
 readln(Nomf2);
 writeln;
 Nomf:='a:'+Nomf1+Nomf2;
 assign(FicEnt,Nomf);
 reset(FicEnt);
 readln(FicEnt,Zone);
 if (Nomf1='tilli') then Fond:=570
  else if (Nomf1='tilava') then Fond:=400
       else if (Nomf1='digfil') then Fond:=200;
 writeln('Pour quel mois voulez-vous voir les resultats ?');
 write(' Entrez un chiffre compris entre 1 et 12 : ');
 readln(Mochoisi);
 writeln;
 writeln('Pour quelles crues voulez-vous voir les lames infiltrees ?');
 write(' Entrez le numero de la premiere crue : ');
 readin(Cruedeb);
 write(' Entrez le numero de la derniere crue : ');
 readln(Cruefin);
 writeln:
 writeln('Pour quelle cote voulez-vous voir la lame ? ');
 write(' Entrez cette cote,en cm : ');
 readln(Cotvu1);
 writeln; writeln;
 writeln('Station : ',Nomf1,'
                                  Annee: ',Nomf2,'
                                                         Mois: ', Mochoisi);
 writeln; writeln;
 writeln('lames en mm, durees en minutes ');
```

```
writeln;
                             1);
write('
write('Pour la cote ',Cotvu1:3:0);
writeln;
write('
                  ');
                               lame cumulee');
write('periode
                      duree
writeln;
(* appel des différentes fonctions et procédures *)
LecEnr;
while (Mo<>Mochoisi) do begin
                 readln(FicEnt,Zone);
                 LecEnr;
                      end;
                 compteur:=2;
                 Duree:=0;
                 NumCr:=0;
                 lamemens1:=0;lamemens2:=0;lamemens3:=0;
while(compteur<Nb+1) do begin
                      Icdebut:=0;
                      Icmax:=0;
                      Icfin:=0;
                      ChercheIntervalle;
                      NumCr:=NumCr+1;
                      if (Mo=Mochoisi) then begin
                      if ( ( NumCr>=Cruedeb ) and (NumCr<=Cruefin) ) then
                                                                begin
                      write('du : ',Tdebut:8:0,' au : ',Tfin:8:0);
                      CoupeCrueTranches;
                      write(' ',TabRes[NumCr] [Round(Cotvu1-Fond+1)]:6:0);
                      EstimeLame;
                      Calclametot;
                                      ', lamemens1:2:0);
                      write('
                                                                 end;
                                                                   end;
                                           end;
                      writeln;
                 end;
end.
```