UNIVERSITE DE MONTPELLIER II I.R.D. MONTPELLIER

DEA « Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental »

Hydrologie d'une zone endoréique sahélienne:

dynamique des vidanges des mares temporaires et alimentation de la nappe phréatique (région de Niamey - Niger)



mare de Kafina (Niger)

Présenté par Jean-Noël FOURCADE Encadré par Christian LEDUC (IRD)

juin 2000

RÉSUME

L'extrême sensibilité des milieux semi-arides en fait des zones privilégiées pour l'étude des mécanismes de la variabilité hydrologique.

Nos recherches s'appuient sur les nombreuses mesures collectées dans le sud-ouest nigérien, au cours de plusieurs programmes de recherche réalisés antérieurement.

Nous nous intéresserons ici aux transferts d'eau à la surface du sol, son accumulation dans les dépressions topographiques et sa redistribution dans la nappe phréatique. Nous étudierons en effet les processus de vidange de plusieures mares endoréiques temporaires dont les situations géomorphologiques sont différentes. L'analyse de l'ensemble des décrues fait apparaître, pour chaque mare étudiée, une dynamique de vidange à deux vitesses :

- un régime rapide (jusqu'à 160 cm/j selon la catégorie de mare) lorsque le niveau de l'eau est haut dans la mare ;

- et un régime lent (entre 1 et 5 cm/j) quand la hauteur d'eau est faible.

Cette différence entre les deux régimes d'infiltration s'explique par un envasement des parois au fond de chaque mare. La limite entre la zone colmatée et la zone non-colmatée peut être franche (seuil) ou au contraire progressive. De manière générale, la zone colmatée progresse au cours d'une même saison des pluies avec la succession des crues.

L'étude des variations de la limite du colmatage est importante, puisque il semblerai que se sont les volumes d'eau infiltrés à partir de la zone non-colmatée (régime d'infiltration rapide) qui jouent un rôle majeur dans l'alimentation de l'aquifère sous-jacent.

MOTS CLÉS :

Sahel, Niger, endoréisme, vidanges de mare, infiltration, volume d'eau.

JOWWATK	50	01	٨М	AI	RĮ
---------	----	----	----	----	----

Résumé

 $\left[\right]$

....

J

.

1. Introduction	р 2
2. Présentation de la zone d'étude	р4
- Climat	p 4
- Géologie	p 4
- Géomorphologie	p 6
- Hydrologie	p 6
- Hydrogéologie	р б
3. Instrumentation, Méthodologie	թ 8
- Mesures des intensités de vidanges	p 8
- Calculs des taux d'évaporation	p 10
- Relation hauteur-volume	p 12
 Dispositif de mesure pour les niveaux piézométriques 	p 12
- processus de vidange d'une mare	p 14
4. Analyse détaillée des vidanges pour chaque mare	р 16
a - Kafina	р 16
Analyse des vidanges	
Bilan	
Evaporation	
b - Bazanga	p 28
contexte pédologique	
Contexte morphologique	
Localisation de la mare dans le bassin versant	
Analyse des vidanges	
Bilan	
Evaporation	
c - Wankama	p 44
contexte pedologique	
Contexte morphologique	
Localisation de la mare dans le bassin versant	
Analyse des vidanges	
Evaporation	
5 Pilon	- 64
J. DIIAII Derméghilité surface colmatée	p 04
Tour d'éveneration	p 04
- Taux u Evaporation	p 00
- Deux regimes	p 08
6. Transfert des eaux de surface vers le domaine souterrain	р 70
- Transfert à partir des mares de plateau	p 70
- Transfert à partir des mares des cours d'eau	p 70
7. Conclusion	р 76
8. Bibliographie	р 78
9. Annexe	p 82

ł

1 .

I

1

1. INTRODUCTION :

Au Sahel, la dégradation du réseau hydrographique est à l'origine d'un mode particulier de redistribution des eaux d'écoulement. Cela se traduit par l'apparition de nombreuses mares endoréiques temporaires pendant la saison des pluies.

On distingue trois types de zone de stockage des eaux : l'endoréisme de plateau, de vallée (mare installée dans un ancien cours d'eau) et de vallée « verrouillée » par les sables éoliens.

Les différentes observations hydrologiques et hydrogéologiques, menées depuis 1990 (Hapex-Sahel) ont montré le rôle fondamental de ces mares dans la recharge de la nappe phréatique et l'hétérogénéité de la réponse de la nappe dans le temps et l'espace.

Le fonctionnement habituel est le suivant : le ruissellement consécutif à la pluie se concentre dans des mares dont la partie centrale est généralement colmatée, alors que les bordures épisodiquement noyées sont beaucoup plus perméables et permettent l'essentiel de l'infiltration vers la nappe.

Sur plusieurs sites et pendant plusieurs années un suivi du niveau d'eau dans les mares a été établi et pour une d'entre elles (Wankama), nous disposons dans la même période, de la cote du niveau piézométrique de la nappe sous-jacente.

Grâce à ces relevés, nous allons pour chaque épisode de décrue, identifier la hauteur de la séparation zone colmatée - zone non colmatée. Nous regarderons l'éventuelle augmentation progressive du colmatage, à l'échelle de la saison et sur plusieurs années.

Puis nous chercherons à généraliser les principes de fonctionnement et les différents régimes de vidange qui caractérisent chaque catégorie de mare afin d'évaluer les quantités d'eau qui s'infiltrent et d'établir quelle est la réponse de la nappe vis à vis de ces infiltrations.

Nous commencerons par présenter la zone d'étude, le matériel et l'instrumentation mis en place sur le site puis les méthodes utilisées pour traiter les données recueillies.

Dans le second volet de ce rapport, nous étudierons les processus de vidanges pour chaque mare, puis nous en ferons une synthèse.

Enfin, nous essaierons d'établir les facteurs qui régissent le transfert des eaux de surface vers le milieu souterrain.



Figure 1: pluie moyenne annuelle (1951-1989) sur la région sahélienne avec la position du degré carré de Niamey (carré vert) (tirée de Desconnets 1994)



Figure 2: carte géologique du Niger occidental (tirée de Peugeot 1995)

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE :

Le Sahel est la zone qui borde le sud du Sahara et forme la transition entre l'Afrique désertique et l'Afrique humide.

Les limites du Sahel fluctuent selon les auteurs. Elles peuvent être définies d'un point de vue pluviométrique comme l'espace compris entre les isoyètes 200 et 700 mm (Fig. 1). Malgré la grande variabilité interannuelle et spatiale, l'isoyète 200 mm peut être considéré comme la limite nord de l'espace dans lequel les cultures pluviales sont possibles (*Courel, 1984*).

D'un point de vue strictement hydrologique (écoulement de surface), *Rodier (1975)* définit le Sahel comme une région caractérisée par la **dégradation hydrographique**, conséquence du déficit pluviométrique et des faibles pentes (cela correspond à la zone comprise entre les isoyètes 300 et 700 mm).

Quelles que soient les définitions proposées, la région de Niamey se situe au cœur de cet ensemble semi-aride.

Le climat :

L'alternance au cours de l'année d'une longue **saison sèche** suivie d'une courte **saison pluvieuse** bien marquée s'explique par le cycle annuel de l'équateur météorologique, défini comme la frontière des masses d'air boréale et australe. En été boréal, sa trace au sol remonte sur l'Afrique de l'Ouest jusqu'à 12° N de latitude alors que sa position d'hiver se situe aux environs de 5° N. Un flux de mousson apportant un air chaud et humide sur la bande sahélienne est alors généré entre l'anticyclone de Ste Hélène et les fortes dépressions thermiques du Sahara.

L'interface entre le flux de mousson et les masses d'air chaudes et sèches du Sahara constitue **la Zone de Convergence InterTropicale** (ZCIT) dont la trace au sol est le **Front InterTropical** (FIT). La remontée plus ou moins rapide du FIT vers le nord à partir du mois de mars et la position finale atteinte (elle varie d'une année sur l'autre) conditionnent l'abondance de la saison des pluies.

Enfin, une des caractéristiques fondamentales du Sahel est l'**extrême variabilité** spatio-temporelle du climat et **des précipitations** : des différences de 100 % de la pluviométrie ont été constatées sur moins de 30 km *(Taupin et al, 1993)*, et des périodes excédentaires et déficitaires se succèdent au cours du temps. Ainsi depuis la fin des années 60, le Sahel enregistre une tendance déficitaire.

<u>La géologie du site :</u>

Le contexte géologique général est celui du Niger Occidental, à cheval sur deux ensembles géologiques : le socle précambrien, à l'affleurement dans le Liptako-Gourma (*Peugeot,1995*), vers la frontière du Burkina-Faso, et les formations sédimentaires du bassin des Iullemenden à l'est (Fig. 2). Cet ensemble, mis en place au début de l'aire tertiaire (Paléogène -65 à -25 MA) et composé de grès argileux, est appelé **Continental Terminal** (CT) (*Greigert 1966, Greigert et Pougnet 1965, 1967 in Peugeot 1995*). Au Néogène (-5 à -2 MA) supérieur, le Continental Terminal et la marge des roches du socle se présentent sous la forme d'une très vaste cuvette de pente faible et drainant vers le sud ; une **cuirasse ferrugineuse** recouvre les sédiments argileux.

Cette surface a été ensuite entaillée par les cours d'eau pour former le paysage actuel, constitué de massifs tabulaires reliques du plateau originel, séparés par des vallées généralement vastes. Cet épisode d'érosion intense, lié à un climat humide, a précédé des périodes très arides au cours desquelles se sont mis en place plusieurs systèmes dunaires.



Figure 3: géomorphologie du site d'étude (tirée de Favreau 1996, d'après Courault et al., 1990)

La géomorphologie du site :

Dans notre zone d'étude, au nord est de Niamey, nous pouvons distinguer trois grands ensembles géomorphologiques, schématisés dans la figure 3 :

- Le <u>plateau à cuirasse latéritique</u>, constitué de sédiments argilo-limoneux du Continental Terminal (CT) est recouvert dans les premiers mètres par une cuirasse latéritique très dure. Les pluies du quaternaire l'ont entaillé et rendu discontinu. On trouve également par endroits des petits ensablements (dunes de plateau). Son couvert végétal apparaît sous la forme typique de brousse tigrée qui se caractérise par une alternance de bandes de sol nu et de bandes de végétation.
- La jupe sableuse est découpée de l'amont vers l'aval en deux unités : le piedmont dégradé dans la continuité du talus de plateau et une zone d'épandage dans laquelle les ravines descendant du plateau s'écoulent et charrient des sédiments argilo-limoneux du CT lors des crues.

L'ensemble est recouvert par des sables éoliens qui s'étendent en moyenne sur 800 m autour des plateaux.

En aval, le sol des <u>vallées et bas-fonds</u> est de texture sableuse fine. On y trouve aussi un horizon à dominante argileuse, vraisemblablement issu d'apports latéraux (épandage des ravines).

L'hydrologie du site :

Le domaine sahélien est en majeure partie **endoréique**. A part le fleuve Niger, qui présente des écoulements permanents dont les principales contributions proviennent des régions tropicales humides, l'ensemble de notre site d'étude est parcouru par un **réseau hydrographique dégradé** et désorganisé ce qui privilégie le stockage des eaux d'écoulements dans la région même de sa production. Cela se traduit pendant la saison des pluies par l'apparition de multiples mares temporaires.

Ces dernières sont de deux types (Desconnets, 1994) :

- les mares de plateau : peu encaissées, subcirculaires, elles se vident surtout par évaporation.
- les mares de bas-fond :- on distingue les mares de vallée, encaissées et allongées, qui s'épuisent principalement par infiltration.

- les mares de vallée « verrouillée » qui sont souvent liées à des comblements sableux du réseau principal de drainage.

L'hydrogéologie du site :

Les séries sédimentaires du CT qui constituent le bassin des Illumenden contiennent trois nappes aquifères superposées. Les deux nappes les plus profondes (nappes captives du CT1 et CT2) se situent vers 120-150m et 70-90 m de profondeur (*Peugeot 1995*), et renferment des eaux fossiles âgées de plusieurs dizaines de milliers d'années.

La nappe phréatique du CT3, quant à elle, se rencontre à des profondeurs variant de 10 à 40 m sous les vallées sableuses à plus de 70 m sous certains plateaux. La dynamique de cette nappe phréatique a été étudiée dans le cadre d'HAPEX-Sahel, et son alimentation préférentielle par les infiltrations sous les mares a été mise en évidence (Desconnets 1994, Leduc et Desconnets 1994a 1994b, in Peugeot 1995).

mesures brutes (niveau sonde)



Figure 4-a : mesures brutes de la sonde limnigraphique à Wankama (juillet 98)



Figure 4-b : mesures corrigées et étalonnées à l'échelle limnimétrique à Wankama (juillet 98)

3. INSTRUMENTATION, MÉTHODOLOGIE :

Les travaux de *Desconnets* (menés de 91 à 93) concernant notamment les mécanismes qui régissent le remplissage et la vidange des différants types de zone de stockage ont amené à sélectionner des sites «échantillons » et à choisir des **mares de références**.

Ainsi nous disposons de 8 années d'observation (92-99) pour la mare de Wankama, la mare de référence du milieu «bas-fond de vallée ».

La mare de **Bazanga** fut suivie de 93 à 96, comme référence du milieu «plateau à cuirasse ferrugineuse », puis ses dispositifs de mesure ont été transférés sur la mare de **Kafina** (fond de vallée verrouillé par du sable) à partir de 97.

Nous allons expliquer ici comment sont recueillies les données sur le terrain, de quelle manière elles sont exploitées et quels ont été les problèmes rencontrés. Nous justifierons nos choix dans la façon de traiter les mesures brutes.

Enfin, nous rappellerons brièvement les principes de base du processus de vidange d'une mare.

Mesures des intensités de vidange :

a- mesure de terrain

La mesure réalisée sur chaque mare est celle du **niveau du plan d'eau**. Pour cela l'instrumentation de base est un système permettant l'**enregistrement automatique** du niveau (station limnimétrique CHLOE).

Cela consiste à coupler une sonde piézo-résistive mesurant la hauteur d'eau par différence entre la pression hydrostatique du liquide et la pression atmosphérique, et une centrale d'acquisition reliée à la sonde par un câble enterré. Le déclenchement de l'acquisition est fonction d'un seuil de variation de niveau et d'un intervalle de temps choisi par l'utilisateur.

En saison des pluies, le pas d'échantillonnage intéressant s'est avéré être un seuil de déclenchement de 1 cm pour un intervalle d'interrogation de 5 minutes. Il décrit de manière satisfaisante l'événement de crue et les premières heures de vidange des stocks. Par contre on enregistre parfois, à cause du vent, de la venue de bétail ou du faible volume d'eau résidant dans la mare, des acquisitions parasites en phase lente de destockage.

Environ une fois par semaine, pendant la saison des pluies, on relève aussi par **lecture directe** sur l'échelle limnimétrique le niveau de l'eau. Cela permet de corriger et de recaler les dérives possibles des stations automatiques.

b- exploitation des données

Les données brutes enregistrées par les limnigraphes sont recalées systématiquement par rapport aux mesures ponctuelles, pour corriger la dérive des appareils de mesures.

- Les courbes de vidange sont visualisées à partir des diagrammes « hauteur d'eau / temps ». De nombreuses perturbations viennent gêner la clarté de ces courbes (bruit de fond, ondulations provoquées par les vagues...) ainsi il faut pour chaque décrue gommer les mesures parasites (fig. 4 a et b).
- Pour plus de clarté et gommer les artefacts, les intensités de vidanges et autres données établies à partir des relevés limnimétriques, sont calculées en moyenne tous les deux centimètres de baisse du niveau de l'eau (fig. 7 c).

En effet en établissant une intensité de vidange pour chaque cm de décrue dans une mare, on obtient des courbes d'intensité de vidange en « dent de scie » (Cas de la première décrue de la saison 95 (fig. 7 a)).



Figure 5-a: mesures brutes du niveau de l'eau à Wankama (seconde décrue 97)



<u>Figure 5-b:</u> mesures corrigées du niveau de l'eau à Wankama (seconde décrue 97)



Figure 6: calculs des taux de vidanges pour la seconde décrue de Wankama en 97.

Par contre un pas de 5 cm n'est pas assez précis pour déterminer par exemple la hauteur d'eau dans la mare où on observe un changement de régime (ici entre 3.35 m et 3.40 m) (fig 7-b).











Figure 7 c: Taux de vidange calculés tous les <u>2 cm</u> de décrue

 Pour l'année 97 les enregistrements du niveau d'eau à Wankama ne sont pas exploitables : des ondulations journalières dans le signal de sortie (fig. 5 a et b) ne permettent pas de calculer les taux de vidanges.

En prenant le cas de la seconde décrue, les calculs des intensités de vidanges (fig. 6), qu'ils soient effectués tous les 1, 2 ou 5 cm, ne donnent qu'un nuage de point dans le diagramme « intensité de vidange / temps ».

En calculant la moyenne flottante (avec dix valeurs d'intensité) sur l'ensemble de l'épisode (fig.7), on obtient un signal ondulatoire de période et d'amplitude aléatoires qui n'est pas interprétable.

<u>Calculs des taux d'évaporation :</u>

L'ensoleillement et les conditions climatiques étant très variables dans l'espace et le temps, nous avons choisi de garder les **mêmes taux d'évaporation** pour chaque mare et ainsi d'**homogénéiser** ce paramètre afin de comparer d'une mare à une autre uniquement le phénomène d'infiltration.



Figure 8: schéma du dispositif piézométrique à la mare de Wankama (tirée de Desconnets 1994)

,

Nous avons donc établi un taux d'évaporation par mois, calculé sur une moyenne de 10 ans, à partir des relevés de la station de Sadoré. Sadoré se trouve au sud ouest de Niamey, au cœur d'une zone de plateau soumise à une évaporation probablement plus importante qu'au site d'étude, mais aussi plus humide.

Les mesures sont réalisées in situ sur bac de classe A et corrigées avec la relation empirique de *Pouyaud* (1986) reliant l'évaporation d'un lac et d'un bac de classe A (Annexe).

Desconnets dans sa thèse (1994) a comparé plusieurs méthodes d'estimation de l'évaporation :

- la méthode chimique qui consiste à doser un élément conservatif (ici le sulfate) dans l'eau ne permet pas véritablement d'estimer la part évaporée, l'erreur de mesure des teneurs en sulfate étant trop importante pour les très faibles valeurs.
- la méthode isotopique (mesure de la conductivité et teneur isotopique de l'eau (δ O18)) donne des résultats satisfaisants de même ordre de grandeur (à 10% près) que les résultats issus des bacs.
- les mesures obtenues à partir des bacs de classe A, et corrigées pour être appliquées sur les mares, sont fiables, même si elles ont tendance à sous-estimer l'évaporation pour les mares de plateau et surestimer l'évaporation pour les mares de bas-fonds.

<u>Relation hauteur-volume :</u>

Pour Bazanga, nous avons gardé les valeurs établies à partir du relevé topographique de la mare, établi par Desconnets (annexe).

Pour Wankama, les estimations de Desconnets sont contestées pour les niveaux d'eau les plus forts. Le nivellement de la mare n'étant pas complet, Desconnets avait pour sa thèse (1994) extrapolé les derniers niveaux. Depuis, un nivellement complémentaire a été réalisé par Peugeot (1995) et nous prendrons ses valeurs pour notre étude (annexe).

Enfin, pour Kafina nous disposons d'un nivellement établi par Favreau (1996) (annexe).

Pour éviter tout risque de transcription, nous ne parlerons que hauteur d'eau lue sur l'échelle limnigraphique, ce qui ne représente pas toujours l'épaisseur réelle de la lame d'eau dans la mare :

ainsi, pour Bazanga, une hauteur de 2 mètres lue sur l'échelle correspond à 0 m d'eau dans la mare.

Pour Wankama, il faut soustraire 3 m à la lecture de l'échelle pour avoir la hauteur d'eau réelle dans la mare.

Enfin, pour Kafina, une hauteur de 1 m lue sur l'échelle correspond à o m d'eau dans la mare.

• Dispositif de mesure pour les niveaux piézométriques :

Dans le cadre de la mission Hapex-Sahel, pour mieux comprendre entre autres la dynamique de recharge de la nappe phréatique du CT3 et pour quantifier l'évolution décennale de l'infiltration sous les mares, un réseau de piézomètres a été installé autour de plusieurs sites (mare de Banizoubou, mare de Wankama, mare de Maourey kouarazéno et mares du kori de Diantadou).

A la mare de **Wankama**, le dispositif de mesure est composé de trois piézomètres situés à 30, 80 et 180 mètres de la mare, disposés le long d'un transect perpendiculaire à l'axe longitudinal de la mare (fig. 8). Les trois piézomètres sont suivis en continu.

Un an après la mise en place des piézomètres, la pluie a creusé le sable autour des tubes. Ainsi, à partir de 1994, à chaque début de pluie, de l'eau ruisselle le long des tubes, fausse les mesures et il est donc difficile de déterminer précisément l'écart de temps entre le début de l'infiltration et la réaction de la nappe.

De la même manière que pour les mesures du niveau d'eau dans les mares, les données brutes doivent être « nettoyées » et corrigées avant d'être exploitées. S. Massuel dans le cadre de son travail au cours d'un stage de 6 mois s'en est occupé.

Processus de vidange d'une mare :

En hydrologie, les études de l'infiltration sont le plus souvent destinées à prédire, suite à une pluie, le moment d'apparition du ruissellement sur un sol et les quantités ruisselées. Les études d'**infiltration** sous charges sont plus rares.

De manière générale, le processus physique de l'infiltration alimenté par une pluie peut être décrit de la manière suivante : l'entrée de l'eau dans le sol est à la fois gouvernée par les forces capillaires et les forces de gravité. Toutes les deux évoluent en sens opposé au cours de l'infiltration.

- Les forces de **capillarité** sont dominantes dans un **profil non saturé**. Elles sont déterminées par le taux d'humidité. Plus ce taux est fort et moins les forces de capillarité auront de l'importance.

- Les forces de **gravité** deviennent dominantes au fur et à mesure que le profil d'infiltration tend vers la **saturation**. En effet, la conductivité hydraulique tend vers sa valeur maximale lorsque l'humidité est proche de la saturation.

Dans notre étude, l'infiltration se fait sous une charge d'eau variable. Ainsi, la vitesse d'infiltration initiale va dépendre d'une part de la hauteur de la lame submergeante et d'autre part, de la succion capillaire.

Par contre, la vitesse d'infiltration finale sera essentiellement réglée par la conductivité hydraulique K du matériau.

Pendant la saison des pluies, les bassins n'ont pas le temps de s'assécher entre deux épisodes de crue, et les conditions d'humidité sont toujours à saturation dans le fond de la mare. Il apparaît donc que la vidange d'une mare est fortement liée à la conductivité hydraulique du sol. La hauteur d'eau ne joue un rôle important dans l'infiltration que pour les zones temporairement inondées.

4. ANALYSE DÉTAILLÉE DES VIDANGES POUR CHAQUE MARE

a. **KAFINA** : (photo page de couverture)

Nous ne disposons pas pour cette mare d'études pédologiques ni morphologiques. Nous pouvons simplement la décrire en précisant qu'elle est de forme circulaire, et peu profonde. Un verrou sableux, à l'aval de la mare empêche l'évacuation de ces eaux. Ses coordonnées sont 13°44,05' N - 2°43,08' E.

Les pluies à Kafina gardent le même type de distribution sur les trois années d'observation exploitées. La majorité des épisodes pluvieux sont de petites pluies (entre 0 et 20 mm) et un ou deux gros événements (60 mm et plus) tombent chaque année (tab 1, fig. 9).

En 97, le pluviométre n'a été installé que le 18 août, seule la dernière partie de la saison a donc été enregistrée. Par contre les mesures du niveau de la mare ont débuté le 27 juin de la même année donc en début de saison des pluies.

année	cumul pluie (mm)	cumul eau arrivée à la mare (m3)	rapport V ruisselé / pluie	volume infiltré (m3)	rapport V inf / pluie
97	*135*	29 1 19	tel Statistica de la	20 308	
98	401	41 499	103	32 837	82
99	475	40 875	86	31.791	67
moyenne par an	337	37 164	95	28 312	75

<u>Tableau 1:</u> Kafina



Figure 9: Pluies classées en fonction de leur importance pour chaque année



Figure 10: Enregistrement limnimétrique de la mare de Kafina en 1997



Figure 11: intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

<u>Analyse des vidanges</u> :

La connaissance des caractéristiques de la vidange pour la mare de Kafina est basée sur 24 épisodes de vidange observés entre 1997 et 1999.

Pour l'analyse de chacune des trois années de mesure, nous n'avons sélectionné qu'un certain nombre de décrues(18 / 24). Ce choix a été guidé par deux critères :

- principalement, la hauteur initiale de l'épisode qui semble être un des principaux facteurs déterminant l'intensité de la vidange (Desconnets et al, 1993)

- la durée de l'épisode qui doit être suffisante pour observer des variations de niveau et d'intensité significatives.

De même, pour les épisodes de vidange finale on ne conservera que les variations significatives de niveau d'eau et on supprimera la «queue» de vidange (jusqu'à l'assèchement de la mare) car le processus d'évaporation devient alors dominant et la qualité des enregistrements limnimétriques ne permet pas une approche fine de ce phénomène.

Pour l'année 97 :

On compte 6 épisodes pluvieux en 1997 (fig. 10) sur la mare de Kafina. Les deux premiers événements sont les plus important avec une montée des eaux de plus de 70 cm pour la première pluie et de plus de 60 cm pour la seconde.

Avec l'analyse des courbes de vidange (fig. 11), on observe pendant le premier épisode un changement brutal de la baisse de l'intensité de vidange, vers le niveau 1.67 m à l'échelle : pendant la première phase le taux de vidange chute de 13 cm/j à 3.2 cm/j en six jours (taux moyen 7.7 cm/j), alors que sous la limite des 1.6 m, ce taux passe de 2.8 cm/j à 0.5 cm/j très lentement (plus de 15 jours) (taux moyen : 2 cm/j).

La présence d'une zone imperméable est mise en évidence par les intensités finales de la vidange très faibles (moins de 2 cm/j).

Lors du second et du sixième épisode, on observe de nouveau des **taux élevés** (respectivement en moyenne 6.5 cm/j et 6.4 cm/j) pendant la **première phase de la vidange** au-dessus de la zone imperméable. Mais vers 1.80 m à l'échelle, au lieu d'observer une brisure nette de la courbe des intensités, la transition de régime entre les niveaux non colmatés et colmatés se fait progressivement jusqu'à 1.67 m (entre 1.80 m et 1.67 m on a respectivement 2.8 cm/j et 2.3 cm/j en moyenne). Sous le seuil des 1.67 m nous sommes dans la zone considérée comme imperméable et les intensités finales de vidanges sont de l'ordre du cm/j (1.3 cm/j et 1 cm/j).

Ainsi au cours de la saison 97, les parois de la mare se sont colmatées sur une hauteur d'une dizaine de cm au-dessus du seuil de perméabilité (1.67 m) établi lors du premier épisode.

En fin de saison, on peut donc latéralement distinguer trois types de limite :

- au-dessus de 1.80 m par rapport à l'échelle, on a un régime d'infiltration caractéristique de la zone non colmatée
- de 1.67 m à 1.80 m pendant la saison des pluies des dépôts fins viennent colmater les parois, ce qui fait chuter progressivement les taux d'infiltration de plus de 60 %.
- enfin, le fond de la mare et les parois jusqu'à une hauteur de 1.67 m sont considérés comme imperméables. On observe un régime de vidange à dynamique linéaire, avec une décroissance proche de celle d'un régime d'évaporation pour les très faibles épaisseurs d'eau.



Figure 12: enregistrement limnigraphique de la mare de Kafina en 98



Figure 13: intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

Pour l'année 98 :

En 98, on peut compter 5 décrues majeures (fig. 12), mais les descriptions des vidanges seront divisées en 8 épisodes, car pour la première grosse décrue par exemple (jusqu'au 13 août), deux petites pluies viennent perturber la vidange.

Pour le premier épisode de cette saison (fig. 13), on retrouve des taux de vidange élevés audessus de 1.85 m (maximum 20.5 cm/j à 1.9 m). La transition entre les niveaux non colmatés et les couches colmatées s'amorce vers 1.85 m à l'échelle et s'effectue **progressivement** jusqu'à la hauteur de 1.75 m.

Sous la cote de 1.75 m les intensités de vidanges sont très faibles et diminuent très lentement au cours du temps : par exemple, pour le second épisode l'intensité de vidange est de 3.4 cm/j à 1.74 m et va baisser de 1.8 cm en 6 jours, jusqu'à la hauteur de 1.62 m.

Le colmatage des parois semble avoir progressé de 5 cm en hauteur en fin de saison et atteint la limite de 1.90 m. ce nouveau seuil est perceptible dans les deux derniers épisodes de l'année 98 : en effet, pour les épisodes 7 et 8 les premières intensités de vidange (respectivement 9 cm/j et 8.7 cm/j) chutent de 5 à 6 cm en 2 jours (passage de 2.00 m à 1.90 m sur l'échelle) puis diminuent progressivement jusqu'à devenir très faible (ordre du cm/j).

Enfin, après une forte pluie le 12 août 98 (épisode 4), on a observé un maximum d'intensité de vidange pour cette saison de 32 cm/j à la cote 2.15 m lue sur l'échelle.



figure 14: enregistrement limnimétrique de la mare de Kafina en 99



Figure 15: intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

Pour l'année 99 :

Les montées d'eau dans la mare ont été plus nombreuses que les années précédentes (97 et 98), mais d'amplitude beaucoup plus faible (fig. 14).

Pour l'analyse des vidanges (fig. 15), on ne tiendra pas compte des épisodes 5, 6 et 9 sur les 10 enregistrés cette année : de trop courtes durées leurs variations de niveau et d'intensité de vidange ne sont pas significatives.

On retrouve le schéma classique d'infiltration avec la chute des taux de vidange dans la zone non colmatée puis une décroissante lente de ces intensités sous le seuil d'envasement.

On peut suivre parfaitement l'évolution de l'envasement des parois de la mare au cours des quatre mois de cette saison. En juillet lors du premier épisode le seuil de colmatage se trouvait à la hauteur de 1.72 m à l'échelle, puis passe à 1.75 m pour le troisième épisode, à 1.82 m pour la quatrième vidange et atteint le niveau de 1.90 m pour les événements 7 et 10.

Enfin on trouve les plus forts taux de vidanges enregistrés sur la mare de Kafina pendant les trois années de mesure lors de l'événement 7, avec un maximum de 36 cm/j à la cote 2.14 m.





Figure 16: sélection de courbe de vidange

Date	Hauteur		Intensité		Intensité	Nombre de jours
	de début	de fin	de début	de fin	moyenne	
16/09/1997	1.86	1.20	8.47	1.72	1.91	56
28/07/1998	1.95	1.73	20.57	4.27	9.40	3
06/09/1998	2.02	1.24	8.73	0.74	2.00	63
24/07/1999	1.91	1.65	8.35	2.25	3.87	8
06/08/1999	2.14	1.78	96.00	2.30	11.69	7

tableau 2: Bilan des vidanges pour Kafina (sur les trois années de mesures)

• <u>Bilan :</u>

Variabilité sur les 3 ans :

Nous avons sélectionné dans la figure 16 et le tableau 2 quelques-unes unes des courbes de vidange les plus symboliques de la dynamique de la mare.

Pour chaque épisode, la comparaison des intensités moyennes de vidange et des intensités initiales et finales met en évidence qu'au sein d'une même décrue ce taux varie très fortement.

Au cours des trois saisons des pluies, on a pu observer une **progression de l'envasement du fond** et des parois de Kafina. Avec la succession d'événements pluvieux et à chaque montée du niveau de l'eau dans le bassin, du matériel fin vient se déposer et donc colmater un peu plus les rivages de la mare.

Ce seuil est passé de 1.67 m à 1.80m en 97, de 1.85 m à 1.90 m en 98 et de 1.72 m à 1.90 m en 99. on observe un gain en hauteur minimum de 5 cm pour l'année 98 et un maximum de 18 cm pour 99.

En 97 la hauteur d'eau dans la mare n'a pas dépassé 1.90 m alors qu'elle a atteint 2.15 m pour 98 et 99, ce qui explique la différence de 10 cm entre les seuils maximums atteint pour les trois saisons. La hauteur finale de cette limite semble donc dépendre du niveau de l'eau atteint dans le bassin pendant la saison.

Par contre, la hauteur initiale du seuil d'envasement lors du premier remplissage de la mare ne suit pas de règle précise. On peut imaginer que durant l'hiver, le vent, la dessiccation et le bétail cassent la pellicule de matériel fin déposé sur les rives lors de la saison précédente, le seuil de colmatage baisserait alors en fonction de la durée et de l'importance de la saison sèche.

Mais comment expliquer un seuil à 1.85 m lors des premières vidanges de 98 alors que la hauteur maximum de cette limite atteignait 1.80 m en novembre 97, puisqu'il n'y a pas eu de nouveaux dépôts pendant l'hiver 98 (pas de pluies) ? Un dépôt éolien ne peut pas expliquer une telle limite.

La transition de régime entre la zone envasée et la zone non colmatée se fait très progressivement. Quel que soit l'événement, il n'y a pas de différence entre les courbes de décrues, elles restent identiques pour chaque épisode et se calent sur le niveau plus ou moins haut du seuil d'envasement dans la mare.

25

|

• Évaporation :

Au-dessus du fond envasé de la mare, l'évaporation ne représente pas plus de 10 % de la vidange (Fig. 17). Dans la **zone colmatée**, ce pourcentage reste compris dans un intervalle de 10 à 15 % pour les épisodes courts, mais peut atteindre plus de 30 % lors des longues décrues (plus de 8 jours).

Enfin, à la fin de chaque saison des pluies, au cours de la dernière décrue (jusqu'à l'assèchement de la mare), l'évaporation devient le principal processus de vidange (60 à 70 % du phénomène) lorsque le niveau de remplissage est très bas. En effet, la hauteur d'eau étant très faible, les particules en suspension dans la mare se concentrent et vont floculer pour se déposer au fond de la cuvette jusqu'à former une boue visqueuse. L'infiltration devient alors négligeable devant l'évaporation.



Figure 17: Importance de l'évaporation dans la vidange de la mare en fonction de la hauteur d'eau

27

i.

b. BAZANGA : (photo a)

La mare de Bazanga est prise pour référence des systèmes endoréiques de plateau à cuirasse ferrugineuse et a pour coordonnées 13°35,12' N - 2°38,91' E.



Photo a: mare de Bazanga

<u>Contexte pédologique :</u>

Nous reprendrons de manière plus succincte, les descriptions établies par *Desconnets (1994)*. D'après *Nagumo (1992 in Desconnets 1994)*, les sols présents sur le site de Bazanga peuvent être définis comme des sols argileux peu profonds de couleur brun rouge avec localement un dépôt éolien de surface.

L'analyse du contexte pédologique a été concentrée sur trois profils (fig.18) dont les observations ont été réalisées en saison sèche lorsque l'ensemble de la cuvette est à nu.

<u>Profil_1</u>: (point le plus bas)

Ce profil révèle la présence d'une faible couche de sol reconstitué, entièrement ou en partie, de dépôts récents de texture fine (limono-argileuse) d'origine sédimentaire (en surface).

La texture et la couleur des matériaux, ainsi que la présence d'éléments oxydés qui la composent, semblent indiquer qu'il y règne une hydromorphie importante, autant à la surface qu'au contact de la cuirasse. A la verticale de ce point bas, les sédiments de surface et la cuirasse continue et compacte semblent se comporter comme une barrière imperméable à l'évacuation verticale des eaux de la mare ce qui entraîne une altération des matériaux ferrugineux.

 <u>Profil 2</u>: (situé dans la zone de transition entre des matériaux de couleur gris clair et des matériaux de couleur brune)

Dans ce profil, les caractères de dépôts sédimentaires ne subsistent qu'en surface par la présence d'une fine couche à texture limono-argileuse qui est posée sur un sol brun sablo-argileux peu profond. Il apparaît ici que l'influence de la mare est nettement moins importante et n'a pas créé un milieu hydromorphe strict similaire au profil précédent. En comparaison des sols typiques présents sur les



Figure 18: profil pédologique dans le point bas (P1), dans la zone de transition (P2) et dans la zone temporaire d'inondation (P3) *(tirée de Desconnets 1994).*

plateaux à cuirasse ferrugineuse, celui ci se différencie par un démantèlement et une altération chimique plus poussée du matériaux ferrugineux (éléments grossiers fragiles et enrobés d'argile). Cette évolution plus poussée de ce sol est à mettre en relation avec un important régime hydrique interne provoqué par les inondations temporaires mais fréquentes du terrain.

Profil 3 : (situé dans une zone temporairement inondée)

Ses principales caractéristiques sont : une compacité importante, une texture sablo-argileuse passant rapidement à argilo-sableuse en profondeur et la présence, très localisée (profondeur intermédiaire), de taches grises et rouges, indice d'un faible engorgement temporaire. La nature de ce sol et son évolution apparaissent peu influencées par la présence de la mare.

En étudiant l'extension verticale et latérale des dépôts, on remarque que le matériau sédimentaire limono-argileux est en discordance avec le matériau autochtone ancien (sol issu du démantèlement de la cuirasse). Son épaisseur s'efface progressivement du point bas de la cuvette au point haut où la fréquence des inondations a été suffisante pour marquer sa surface d'un dépôt sédimentaire. La disparition progressive des caractères sédimentaires laisse la place au sol autochtone.

Desconnets dans sa thèse, a montré que les dépôts sédimentaires sont en contact avec la cuirasse dans les points bas et a mis en évidence la discordance existant entre les sols hérités du démantèlement de la cuirasse à la limite d'inondation des eaux de la mare. D'autre part, on remarquera une dissymétrie des dépôts entre le versant SW de la cuvette et son versant opposé. Au même niveau topographique, cette épaisseur varie de 10 (versant NE) à 40 cm (versant SW).

Avec un léger pendage NE-SW, la cuirasse ferrugineuse s'enfonce notablement à la verticale du bourrelet du sol (sous le profil 3). Ce bourrelet est d'ailleurs un lieu largement colonisé par une végétation herbacée et ligneuse anormalement développée pour une situation identique (Desconnets, 1994).

Enfin, toujours d'après les travaux de *Desconnets*, les indices d'hydromorphie constatés dans le plancher des dépôts semblent confirmer l'hypothèse d'une forte imperméabilité du matériau ferrugineux compact et continu, tout au moins sous la mare de Bazanga.



Figure 19: profil en long du bassin endoréique et localisation de la mare de Bazanga (tirée de Desconnets 94)

• <u>Contexte morphologique :</u>

La mare de Bazanga peut se caractériser (Fig. 20) par une forme ovale avec un très faible encaissement : sur la coupe transversale le dénivelé moyen est de 0.6 mètre pour un diamètre de 120 mètres. Le fond de la mare a un relief très régulier et les versants sont de type convexe.







Figure 21: distribution des pluies dans le temps à Bazanga.



Figure 22: pluies classées en fonction de leur importance pour chaque année
• Localisation de la mare dans le bassin versant :

Les profils en long dans la figure 19 permettent de localiser l'emplacement et l'extension de la mare au sein de son bassin d'alimentation.

La mare de Bazanga comme l'ensemble des mares de plateau ne reçoit pas les eaux d'écoulements de son bassin par l'intermédiaire d'un drain collecteur. L'alimentation se fait par un écoulement en nappe convergeant vers la mare. L'écoulement concentré reste toujours très faible et se réduit à quelques zones incisées proches de la mare.

année	cumul pluie (mm)	cumul eau arrivée à la mare (m ³)	rapport V ruisselé / pluie	volume infiltré (m ³)	rapport V inf / pluie
90	347.5			Section of	No. 21-34
91		*11 922*		*8 565*	
92	504.2	34 497	49	28 103	56
93	462.6	27 772	60	23 293	50
94	635.0	35 769	56	29 258	46
95	493.9	25 173	51	20 302	41
96	570.2	31 100	55	19 022	33
moyenne par an	502.2	24 062	54	19 996	45

Tableau 3: Bazanga

Ainsi, en établissant le rapport pour chaque année (Tab. 3) entre le cumul de l'eau arrivée à la mare en m^3 et le cumul des pluies en mm, on constate que ce rapport reste assez faible (environ 50) pour Bazanga (ce rapport peut dépasser 300 pour les mares de vallée). Cet écart entre les rapports est évidemment lié aux tailles différentes des bassins versants.

En observant la distribution des pluies, on s'aperçoit (fig. 21) qu'en 96 la saison a été divisée en deux périodes (pluviométrie maximum en juin et août et baisse en juillet) alors qu'habituellement la saison enregistre un seul grand pic de pluviométrie en juillet/août. On pourrait penser que des pluies «groupées » favoriseraient le ruissellement et donc le remplissage de la mare, mais ce n'est pas le cas pour les mares de plateau.



Figure 24: intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare



Figure 26: intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

• Étude de la vidange :

La connaissance des caractéristiques de la vidange pour la mare de Bazanga est basée sur 34 épisodes de décrue observés entre 1994 et 1996. Comme pour l'étude de la mare de Kafina, nous avons sélectionné les décrues qui apportent le plus d'intérêt pour notre étude.

Pour l'année 91 :



Figure 23: enregistrement limnigraphique de la mare de Bazanga en 91

Au cours de la saison 91, les limnigraphes ont enregistré 5 crues avec une hauteur d'eau maximum dans la mare de 3.16 m à l'échelle, atteinte dès la première pluie (fig. 23). Les taux de vidanges (fig. 24) ne dépassent pas 8 cm/j et décroissent rapidement jusqu'à la cote de 2.97 m. Passé cette cote les intensités de vidanges sont très faibles (de l'ordre du cm/j) ce qui nous indique que le passage entre la zone non colmatée et le fond envasé est rapide et peut être assimilé à un seuil d'imperméabilité.

Pour l'année 92 :



Figure 25: enregistrement limnigraphique de la mare de Bazanga en 92

La hauteur maximum d'eau atteinte dans la mare est de 3.33 m à l'échelle (enregistrée en milieu de saison au mois d'août) (fig.25).

Au cours des six mois de mesures 12 décrues ont été enregistrées :



Figure 28: intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

La plus longue est la première (si on exclut la dernière, jusqu'à l'assèchement de la mare) avec 24 jours et une baisse du niveau d'eau dans la mare de 20 cm. La plus spectaculaire, la sixième, affiche elle aussi une baisse de niveau d'eau de 20 cm mais pour une période de trois jours seulement!

Une telle hétérogénéité dans les vitesses de vidange (fig. 26) ne peut pas être expliquée uniquement par une variation possible du taux d'évaporation (trois jours venteux et de gros soleil pour le sixième épisode et un mois nuageux pour la première décrue), mais par la présence donc des deux zones dans la mare.

En effet, pour la première décrue la hauteur d'eau maximum (2.73 m) reste sous la limite colmatée/non colmatée, les parois envasées de la mare rendant impossible des taux de vidanges supérieurs à 1.5 cm/j. Par contre pour l'épisode 6, l'intégralité de l'eau s'est vidangée au-dessus de la zone colmatée, avec des taux d'infiltration compris entre 12.5 et 4.5 cm/j.

D'après l'analyse de la figure 26, le seuil de perméabilité est passé de la cote 2.92 m en début de saison des pluies, à la hauteur de 2.96 m pour les dernières décrues.

Pour l'année 93 :

Nous ne possédons pour cette année là que des mesures ponctuelles du niveau d'eau dans la mare (pas d'enregistrement automatique). Ces données insuffisantes ne sont pas interprétables.

Pour l'année 94 :



mesures limnigraphe

Figure 27: enregistrement limnigraphique de la mare de Bazanga en 94

Sur les 13 épisodes enregistrés, on écarte les 2 premiers et le neuvième, trop brefs pour être exploités (fig. 27).

Sur l'ensemble des autres décrues, on n'observe pas d'évolution significative du seuil de perméabilité. Le changement d'intensité d'infiltration (passage de la zone non colmatée à la zone colmatée) s'effectue à une hauteur d'environ 2.97 m à l'échelle (fig. 28).



Figure 31: intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare



Figure 32: intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

Pour l'année 95 :

L'année 95 est caractérisée par de nombreuses crues mais d'amplitudes moyennes (20 cm) (fig. 29). Pour l'analyse des courbes de vidanges, on ne garde que 8 épisodes sur 16 enregistrés pour plus de clarté dans les graphes (fig. 31).



Figure 29: enregistrement limnigraphique de Bazanga en 95

On peut discerner pendant le second et le troisième épisode, une petite variation d'intensité de vidange pour chaque décrue ; on passe de taux respectivement de l'ordre de 3 et de 5 cm/j à des valeurs proches du cm/j.

Ces variations de taux se font à une hauteur de 2.85 m pour le second épisode et de 2.90 m pour le troisième.

Pour toutes les autres décrues, le seuil de perméabilité reste à une hauteur stable de 2.92 m, sauf pour les pluies 12 et 14 où il atteint la cote 2.95 m.

Le passage de la zone non colmatée à la zone envasée est franc puisque l'on passe directement pour l'épisode 13 par exemple, d'une très forte décroissance des intensités (pente de -58 j⁻¹), à une pente très faible proche d'un régime d'évaporation (pente de -0.4 j⁻¹).

Pour l'année 96 :



- mesures limnigraphe

Figure 30: enregistrement limnigraphique de la mare de Bazanga en 96



Figure 33: sélection de courbes de vidange

Date	Hauteur		Intensité		Intensité	Nombre de jours
	de début	de fin	de début	de fin	moyenne	
01/09/1991	3.05	2.69	8.23	0.82	1.87	33
01/08/1992	3.20	12.52	2.92	0.89	6.75	9
26/08/1994	3.08	2.94	9.76	1.09	3.90	8
09/09/1994	3.33	23.04	2.72	0.49	7.65	41
26/09/1995	3.06	9.76	2.22	1.09	1.88	74

tableau 4: bilan des vidanges pour la mare de Bazanga (sur les 6 ans de mesures)

Pour cette année, les épisodes enregistrés après le 27 juillet ne sont pas exploitables (fig. 29): l'appareil de mesure enregistre en effet des variations journalières ondulatoires qui semblent en relation avec l'éclairement solaire. Une défaillance dans les panneaux solaires et dans la batterie serait à l'origine de ce problème.

Sinon, l'étude des 5 premiers épisodes (fig. 31) fait apparaître un seuil de perméabilité à la cote 2.98 m à l'échelle (3.00 m pour le quatrième épisode).

Le passage entre la zone colmatée et non colmatée se fait progressivement et n'est pas bien défini lors de la première pluie.

• <u>Bilan :</u>

Variabilité sur les 6 ans : fig. 33 et tab. 4 (sélection des décrues les plus symboliques de la dynamique de vidange de la mare)

D'une année sur l'autre la position du seuil de perméabilité varie de 2.92 m à 2.98 m pendant notre période de mesure. La variabilité interépisode est peu marquée.

Au cours d'une même année après que les premières pluies rincent les parois de la mare, le seuil semble garder une position stable et l'envasement ne progresse pas avec la succession des pluies.

Le passage entre la zone colmatée et non colmatée est brutal, le seuil d'envasement est toujours bien marqué et ne varie que très peu (5-6 cm) au cours d'une saison et d'une année sur l'autre.

Les grosses pluies (plus de 600 mm) en 92, 94 et 96 (saisons les plus humides) ne semble pas avoir de conséquences directes sur le processus de vidange de la mare. Le niveau de la mare est dans ce cas plus haut, la zone non colmatée plus inondée, et les taux de vidanges plus élevés en début d'infiltration. Mais cela ne modifie pas le processus d'infiltration à double régime.

Évaporation :

Au dessus de la limite zone colmatée / zone non colmatée, l'évaporation ne représente pas plus de 10 % de la vidange. Lorsque le niveau de l'eau dans la mare passe sous cette limite, les taux d'infiltrations chutent jusqu'à des valeurs inférieures au cm/j et l'évaporation prend rapidement de l'imporatnce dans le processus de vidange de la mare. Pour la quatrième décrue de 91 (fig. 34), le taux d'évaporation grimpe jusqu'à 50 % avant de se stabiliser.

Lors des dernières décrues (jusqu'à l'assèchement de la mare), ce taux peut monter jusqu'à 60-70 %, dans les faibles hauteurs d'eau. On en déduit que le fond envasé de la mare n'est pas totalement imperméable, puisque de l'eau s'infiltre même si cette infiltration reste très faible (moins de 1 cm/j) (les volumes d'eau infiltrés peuvent être considérés comme négligeables).



Figures 34: Importance de l'évaporation dans la vidange de la mare en fonction de la hauteur d'eau

42

c. WANKAMA : (photo b)

Cette mare sert de référence pour les bassins se déversant dans les anciens cours d'eau. Ses coordonnées sont 13°39,00' N et 2°38,11' E.



Photo b mare de Wankama

<u>Contexte pédologique :</u>

D'après Nagumo (1992, in Desconnets 1994), le site de Wankama est compris dans une unité de sol appelé : sols profonds à sable blanc associé à des sols sableux brun rouge vif. Cette unité de sol est associée à l'unité géomorphologique «lit de rivière ».

La connaissance des organisations pédologiques de la cuvette et de ses pourtours s'appuie sur deux fosses de 3 mètres de profondeur :

- l'une située au centre de la cuvette et proche du point le plus bas,

- l'autre à sa périphérie, situé à l'extérieur de la zone à matériaux fins de couleur grise.

Ces observations ont été réalisées en saison sèche qui laisse à nu l'ensemble de la cuvette. Elles ont été complétées par des sondages à la tarière.

Au centre de la mare, plusieurs niveaux sédimentaires sont superposés. Le niveau supérieur (0-30 cm) argilo-limoneux correspondrait au dépôt actuel. Les dépôts plus grossiers (30-60 cm) pourraient correspondre à des dépôts fluviatiles avant la formation de la mare. Par leur épaisseur (au moins 60 cm), leur texture très fine et leur propriétés gonflantes (fentes de dessiccation en saison sèche) ces deux niveaux peuvent être considérés comme le plancher peu perméable ou imperméable, selon les conditions d'humidité de la mare.

Dans la zone temporairement inondée, nous sommes en présence d'un sol sableux ferrugineux peu lessivé typique des bas-fonds. Malgré sa proximité, on ne retrouve pas les caractères du domaine sédimentaire lié à la mare, que ce soit en surface ou en profondeur.



Figure 36: Profil en long d'une partie du bassin endoréique et localisation de la mare de Wankama (tirée de Desconnets 1994)

L'expression des caractères texturaux et structuraux s'atténue progressivement à la périphérie de la zone sédimentaire. Les dépôts marqués par leur couleur et leurs fentes de dessiccation, en surface, au cours de la saison sèche, sont verticalement plus développés. Ils peuvent atteindre une épaisseur d'environ un mètre. Cette épaisseur est visible dans les fosses creusées pour l'exportation de ce matériau servant à la construction de l'habitat traditionnel.

Ces fosses, par leur situation basse et leur surface plane sont le lieu où l'eau stagne le plus longtemps tout au long de l'année. Les sondages réalisés montrent qu'en dehors de cette zone, l'épaisseur du niveau sédimentaire est nettement moins importante. Très rapidement, elle devient inférieure à 30 cm et ne mesure seulement que 10 cm à la périphérie SE.

Le domaine sédimentaire ne recouvre donc qu'une faible partie du lit des mares installées dans les cours d'eau anciens. On observe une sédimentation durable et épaisse uniquement dans le fond des cuvettes, anciennement le fond du cours d'eau.

<u>Contexte morphologique :</u>

Assise dans un bas-fond de vallée faisant anciennement office de cours d'eau, la cuvette de Wankama a une section transversale très encaissée en comparaison de celle des deux autres mares. Elle a une ouverture de 80 mètres pour une dénivelée maximale de 4 mètres avec un versant ouest légèrement plus abrupt que le versant est. Les différents (fig.35) montrent de fortes irrégularités sur le plancher de la cuvette (nombreuses fosses à banco, (fabrication de briques)). Le profil de la section longitudinale, qui est à l'origine le fond de l'ancien drain, est évidemment moins encaissé et s'étend sur plus de 300 mètres. La mare de Wankama a un plan d'eau de forme très allongée et très étroite.



Figure 35: profils de la cuvette de la mare de Wankama

• Localisation de la mare dans le bassin versant (fig. 36)

Contrairement aux deux autres mares, Wankama est située à l'aval d'un impluvium de forme longiligne (Desconnets 1994). Les eaux d'écoulement de la surface amont du bassin sont drainées par des ravines jusqu'à l'actuelle mare, installée dans le lit du Kori de Diantadou.

Le réseau hydrographique d'alimentation de la mare est constitué d'un collecteur principal qui récupère l'ensemble des eaux du bassin, et est interrompu par la présence d'une zone d'épandage à mipente. Un autre drain, de dimension plus réduite, lié à la présence de la route nationale déverse aussi ses eaux dans la mare. Enfin, une partie du versant sud-ouest du bassin (superficie de quelques hectares) présente de nombreuses ravines qui concentrent le ruissellement jusqu'à la mare. Ce petit réseau ne fait pas partie du collecteur principal.

Les quantités d'eau qui arrivent à la mare sont largement plus importantes que dans d'autres mares (de 110 000 m³ à 170 000 m³). Pour un même cumul des pluies (en moyenne 525 mm) Wankama peut recevoir 5 fois plus d'eau que Bazanga ! Son bassin versant plus étendu (2 km² pour Wankama et 35 hectares pour Bazanga), son réseau hydrographique mieux développé et sa position dans un ancien cours d'eau favorisent largement la concentration des eaux.

année	cumul pluie (mm)	cumul eau arrivée à la mare (m3)	rapport V ruisselé / pluie	volume infiltré (m3)	rapport V inf / pluie
91	567.0	*22 340*	the section of the	*20 520*	
92	590.6	144 430	245	136 820	232
93	499.5	96 017	192	86 999	174
94	645.3	112 002	174	100 916	156
95	542.7	134 941	249	80 112	148
96	536.3	126 772	236	112 637	210
97	392.7	132 100	336	105 944	270
98	555.8	170 225	306	155 663	280
99	514.0	152 591	297	129 241	251
moyenne par an	526.6	132 093	256	103 206	195

* année incomplète

Tableau 5: Wankama



Figure 37: distribution des pluies dans le temps à Wankama

Cependant, le rapport m³/mm (tab. 5) entre le cumul de l'eau arrivée à la mare et le cumul des pluies varie du simple au double d'une année sur l'autre. A Wankama, ce rapport ne semble pas dépendre du type de pluie et de sa répartition dans le temps au cours d'une saison puisque celles ci ont une distribution saisonnière semblable d'une année sur l'autre. Grâce aux figures 37 et 38, on observe la similarité entre chaque saison en ce qui concerne les événements pluvieux. On enregistrerait systématiquement un mois plus humide que les autres en milieu de saison (généralement le mois d'août), les petites pluies (entre 0 et 20 mm) seraient largement les plus nombreuses et on retrouverait toujours une ou deux très grosses pluies (50 mm et plus).

Curieusement le rapport m³/mm maximum a été enregistré pendant l'année la plus sèche (1997 avec 393 mm), et inversement le rendement le plus faible a été obtenu en 94, la saison la plus humide (645 mm).



Figure 38: classement des pluies en fonction de leur importance



Figure 41: Intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare



Figure 43: Intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

• Étude de la vidange :

La connaissance des caractéristiques de la vidange pour la mare de Wankama est basée sur 5 années de mesures automatiques : 93, 94, 95, 96, 98 et 99.

Les données de 97 ne sont pas exploitables. Des ondulations journalières dans le signal de sortie (hauteur d'eau en fonction du temps) ne permettent pas de calculer les taux de vidanges.

Pour l'année 93 :

9 crues ont été enregistrées à la mare de Wankama cette année (fig. 40).



Figure 41: enregistrement limnigraphique de la mare de Wankama en 93

On observe de façon générale une progression de l'envasement tout au long de la saison. Le seuil de perméabilité passe de 3.80 m lors de la première décrue à 3.86 m pendant la cinquième et grimpe jusqu'à 4.38 m au cours du dernier épisode (fig. 41).

Pour les épisodes 7 et 8, on ne peut pas parler de seuil de perméabilité : on observe bien une variation des taux de vidange (respectivement à 4.25 m et 4.32 m), donc un seuil, mais les intensités de vidange, sous ce seuil, restent trop élevées (autour de 4 cm/j) pour considérer le milieu comme imperméable.

L'ensemble des décrues ne présente pas de taux de vidange supérieurs à 40 cm/j, excepté après la très forte pluie du 21 août (60 mm) où les premiers taux de vidange atteignent 160 cm/j.

Pour l'année 94 :



Figure 42: enregistrement limnigraphique de la mare de Wankama en 94

Au cours de la saison, le fond de la mare s'envase progressivement, les taux de vidange sont inférieurs à 5 cm/j sous une hauteur d'eau de 4.12 m en juin, 4.36 m en août et 4.44 m en septembre (+ 32 cm d'envasement sur les parois) (fig. 43).



Figure 46: Intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

En prenant une hauteur d'eau (fig.44) quelconque comme référence, on peut voir que les intensités de vidange chutent au cours des 4 mois de l'étude : pour 4.52 m, on passe de près de 60 cm/j en juin à 8 cm/j en septembre, et pour des hauteurs plus faibles comme 4.45 m, les premiers taux de 27 cm/j en juin chutent à 5 cm/j en septembre.



Figure 44: Baisse du taux de vidange en fonction du temps pour une hauteur d'eau donnée

On constate que la décroissance du régime est d'autant plus faible que la hauteur initiale est forte : en reportant les taux de vidange en fonction de la hauteur d'eau pour tous les épisodes, on obtient un schéma des décrues en «éventail» (fig.43).

Pour l'année 95 :

Les crues sont beaucoup plus importantes qu'en 94 : quatre d'entre elles dépassent largement la cote des 5 mètres (fig. 45).



Figure 45: enregistrement limnigraphique de la mare de Wankama en 95

Le seuil passe de 4.05 m début juillet à 4.15 m mi-juillet, 4.35 m en septembre et progresse jusqu'à 4.39 m pour la dernière décrue en octobre (fig. 46).



Figure 48: Intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

Pendant le mois d'août, les vidanges pour chaque crue étaient soit dans la zone colmatée, soit dans la zone non-colmatée. Il est donc impossible de noter la hauteur du seuil.

Au-dessus de 5.35 m, les taux de vidanges chutent de plus de 50 cm/j pour une baisse du niveau d'eau de 25 cm dans la mare, avant de stabiliser leur décroissance : passé cette zone, les intensités de vidanges baissent alors linéairement suivant une droite de pente plus faible jusqu'au seuil de perméabilité.

Sous ce seuil, les taux de vidanges sont inférieurs au cm/j.

Pour l'année 96 :



Figure 47: enregistrement limnigraphique de la mare de Wankama en 96

On détecte dans le premier épisode de décrue de l'année une variation brutale des taux de vidange de la mare (fig. 48), avec vers 4.35 m un seuil qui sépare deux phases de vidange : la première voit chuter ses taux d'infiltration suivant une pente de 78 j^{-1} alors que pendant la seconde phase, les intensités de vidanges diminuent suivant une pente de 13 j^{-1} . On ne peut pas qualifier cette limite à 4.35 m comme un seuil de perméabilité car les intensités de vidanges restent trop élevées (plus de 5 cm/j).

Les sédiments semblent donc se déposer préférentiellement là où il y a d'abord une forte perméabilité par rapport aux zones déjà partiellement envasées. Les particules trop fines pour sédimenter sous l'effet de la gravité (les eaux restent troubles) seraient entraînées par les flux générés par l'infiltration. Ces derniers sont les plus élevés au niveau des zones à fort taux de perméabilité. Ainsi les particules semblent colmater en priorité les parois «propres».

Les premiers dépôts (dans les premiers instants de décrue) seraient donc plus important au-dessus du seuil de perméabilité qu'en dessous.

Pour les autres épisodes le seuil de colmatage passe de 4.25 m en début de saison à 4.35 m au mois d'octobre.

Sous cette limite qui sépare la zone de la mare où les parois sont envasées, de la zone où l'eau peut s'infiltrer, les intensités d'infiltration ne dépassent jamais 2 à 3 cm/j.

Au-dessus de la zone colmatée, on retrouve le schéma classique des décrues en éventail : c'est à dire qu'en début de saison, les pentes de décrues sont beaucoup plus fortes qu'à la fin de la saison des pluies. On passe d'une pente de 78.6 pour le premier épisode, à 41.7 pour le cinquième, 36.8 pour le neuvième et 14.7 pour le dernier.



Figure 50: Intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

Pour l'année 97 :

Les données de 97 ne sont pas exploitables : des ondulations journalières dans le signal de sortie (hauteur d'eau en fonction du temps) ne permettent pas de calculer les taux de vidanges.

Pour l'année 98 :



Figure 49: enregistrement limnigraphique de la mare de Wankama en 98

Contrairement aux autres années, le seuil de colmatage au fond de la mare ne semble pas évoluer d'un épisode pluvieux à un autre (fig. 50).

Il se situerait approximativement à une hauteur de 4.20 m. A l'exception de la seconde décrue, toutes les droites des intensités de vidange se superposent, c'est à dire que quel que soit l'événement pluvieux, les taux de vidange restent les même pour une hauteur donnée. Il n'y a donc pas de nouveaux dépôts susceptibles de colmater un peu plus les parois et de freiner l'infiltration. Enfin on peut signaler, pour le cinquième épisode (hauteur d'eau maximum de la saison), un second seuil à 4.55 m avec au-dessus une pente de décrue de 720 et en dessous, une pente de 28.



Figure 52: Intensités de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare

Pour l'année 99 :



Figure 51: enregistrement limnigraphique de la mare de Wankama en 99

Seules quelques décrues peuvent être analysées : en effet un bruit de fond vient parasiter l'enregistrement en début et milieu de saison, rendant impossible le calcul d'une partie des intensités de vidange (fig. 51).

On observe des pentes de décrues classiques (fig. 52) avec une variation du régime vers 5.30 m. Comme en 1995, au-dessus de 5.30 m, les taux de vidanges chutent rapidement avant de stabiliser leur décroissance : passé cette zone, les intensités de vidanges baissent alors linéairement suivant une droite de pente d'environ 16 j^{-1} jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre du cm/j. Par contre on ne distingue pas réellement de séparation entre la zone colmatée et la zone non colmatée.

Wankama Vidanges (cm/j)



Date	Hauteur		Intensité		Intensité	Nombre de jours
	de début	de fin	de début	de fin	moyenne	
17/06/1993	4.07	3.47	20.87	2.08	6.78	20
18/06/1994	4.52	3.68	57.60	1.05	9.18	4
11/07/1995	5.59	4.15	96.00	2.81	27.80	10
15/08/1995	5.37	4.49	25.04	7.78	15.62	8
24/09/1995	4.49	3.57	6.00	0.38	1.50	97
09/06/1996	4.54	3.92	22.15	1.95	6.86	15
27/08/1996	5.36	4.30	18.58	1.75	9.86	18
08/06/1998	4.76	3.84	30.32	1.97	11.06	18

Figure 53 et tableau 6: bilan des vidanges de la mare de Wankama (établi sur les 7 années de mesures)

• <u>Bilan :</u>

Variabilité sur les 5 ans :

Jusqu'en 1996, la mare semble suivre chaque année la même évolution pendant la saison des pluies : à chaque averse le fond de la mare s'envase un peu plus et le colmatage des parois peut progresser en hauteur de plus de 55 cm (maximum atteint en 93). Le seuil de perméabilité oscille en moyenne entre 4 m en début de saison et 4.39 m après les dernières décrues (maximum 4.44 m en 94). Entre les niveaux colmatés et non colmatés, la transition de régime est progressive.

Par contre en 1998, le seuil de perméabilité n'est curieusement pas bien marqué (on ne retrouve pas deux régimes de vidange bien distincts) et sa position n'évolue pas au cours de la saison : il est stabilisé à la cote 4.20 m.

Enfin, en 1999, bien que l'on retrouve des courbes de vidange assez similaires aux années précédantes, il nous est impossible de définir un seuil de perméabilité avec les quelques mesures fiables dont nous disposons pour cette année.

On peut remarquer que de façon générale à la mare de Wankama, les décrues des premières pluies ont des taux de vidange qui chutent très vite si on les compare aux épisodes de fin de saison. Ces derniers sont plutôt caractérisés par une baisse de régime linéaire (Schéma en éventail : fig. 53 et tab. 6).

Trois solutions peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène que l'on ne retrouve pas dans les autres mares :

- ✓ L'envasement des bords de la mare, au cours d'une même saison, est régulier sur l'ensemble des parois. Les dépôts sédimentaires ne se concentrent pas uniquement sur le fond dans la zone imperméable, mais tapissent toute la zone inondée. Il n'y aurait donc plus, en fin de saison des pluies, de variation de régime de vidange en fonction de la hauteur d'eau dans la mare.
- ✓ Lors des premières grosses pluies de la saison, l'effet de battance des gouttes d'eau détruit la croûte structurale du sol (la mare est sèche), les agrégats se dispersent et la macroporosité en surface se bouche. L'infiltration baisse d'un facteur 15 à 30 avec le lissage du sol.

Ainsi on peut déjà séparer le régime d'infiltration en deux phases : une phase à vitesse rapide (régime transitoire) tant que la croûte structurale du sol est en place et un régime d'infiltration lent quand celle ci est détruite.

Pour les épisodes en milieu et en fin de saison des pluies, la croûte structurale étant détruite, le régime d'infiltration devient donc plus régulier.

✓ Le phénomène de ressuyage peut expliquer cette évolution du régime d'infiltration entre le début et la fin de la saison des pluies.

Après la saison sèche, lors des premiers épisodes pluvieux, toute la porosité du sol de la mare va être saturée (macro + microporosité).

L'eau contenue dans la macroporosité est drainée rapidement grâce à la gravité, jusqu'à une stabilisation du profil hydrique, où la microporosité sera toujours saturée. L'infiltration se fait alors suivant un front d'humectation et le drainage devient très lent. On retrouve ici le schéma de vidange à deux vitesses.

Pour les épisodes suivants, en milieu et fin de saison, la microporosité du sol est constament saturée, du début à la fin de la décrue, puisque la lame d'eau est continuellement présente, la mare s'étant remplie.

Ainsi seul le régime permanent plus lent caractérise les dernières vidanges.

Évaporation

On retrouve les mêmes phénomènes que pour les deux autres mares :

Au-dessus du seuil de perméabilité, l'évaporation ne représente pas plus de 10 % de la vidange. Dans la zone colmatée, ce pourcentage peut vite augmenter jusqu'à des valeurs restant proche des 35 %, pendant les longues périodes sans pluies entre deux épisodes.



Figure 54: importance de l'évaporation dans la vidange de la mare en fonction de la hauteur d'eau

Enfin, sur l'ensemble des décrues étudiées et plus particulièrement sur les dernières de chaque saison (jusqu'à l'assèchement de la mare), l'évaporation ne devient jamais l'unique processus de vidange de la mare (taux de 100 %, par rapport à la vidange : évaporation + infiltration). En prenant le cas de la dernière décrue de 95 (fig. 54), on s'aperçoit que le taux d'évaporation se stabilise lorsque le niveau de remplissage de la mare est très bas et représente au maximum 80 % de la vidange. Même si la tendance à la stabilisation reste vérifiée, on remarque que ce taux évolue en dent de scie pour les faibles hauteurs d'eau. Les imprécisions de l'appareil limnigraphique lorsqu'il y a peu d'eau, peuvent être à l'origine de ses variations. La variabilité journalière de l'évaporation peut en être aussi la cause : en effet nous avons choisi de prendre un taux d'évaporation moyen par mois, mais l'évaporation réelle fluctue tous les jours en fonction des conditions météorologiques (vent, couverture nuageuse...).



Pourcentage de la surface colmatée





Perméabilité équivalente théorique





mare de Bazanga Perméabilité équivalente théorique





Mare de Wankama

Perméabilité équivalente théorique



5. BILAN : 3 MARES, 3 DYNAMIQUES DE VIDANGES

<u>Calcul de perméabilité du sol :</u>

Loin de pouvoir caractériser les sols des cuvettes des mares comme homogènes, l'étude des organisations pédologiques a montré leur forte discontinuité latérale et verticale : la succession d'un matériau à texture très fine (fond de la mare) de porosité fermée assez développée, à un matériau, soit macro-poreux à texture grossière (cas des mares installées dans les lits de rivière), soit à texture moyenne avec une porosité plus ouverte (cas des mares de plateau).

Ainsi, d'un point de vue fonctionnel, il semble légitime de parler d'une zone fortement imperméable et d'une zone perméable avec une transition très rapide que l'on assimilera à un seuil de perméabilité.

La cote de ce seuil sera déterminée grâce aux variations des intensités de vidange au passage de la limite perméable-imperméable.

Desconnets (1994) a établi une **perméabilité** générale **du sol** pour les mares de Wankama et de Bazanga, en tenant compte des deux types de porosité.

Pour une mare, son lit et ses horizons sous-jacents sont donc constitués de deux compartiments pédologiques homogènes (caractéristiques physiques peu variables).

Soit k1 la perméabilité de l'horizon peu perméable et k2, celle de l'horizon perméable, à l'aplomb de la zone colmatée, la **perméabilité ke du milieu** est :

ou

$$1/ke = 1/k1 + 1/k2$$

$$ke = k1.k2/(k1+k2)$$

Pour une surface inondée comprenant à la fois la zone colmatée centrale (ke) surmontant l'horizon perméable, et une zone verticalement homogène de perméabilité k2, la perméabilité s'écrit :

$$k = (S1ke+S2k2) / (S1+S2)$$

avec

<u>S1 :</u> surface de la zone colmatée

S2 : surface de la zone périphérique inondée

<u>Remarque</u> : la surface S1 est pratiquement submergée en permanence en saison des pluies alors que la valeur S2 varie beaucoup d'un épisode pluvieux à un autre.

Pour le calcul de la perméabilité du sol Desconnets a pris comme valeur de k1 et de k2 les valeurs des paramètres Ks mesurés **expérimentalement** (*Rawls et al 1983*) pour des sols à texture proches des mares étudiées.

Ces valeurs sont de :

- k1 = 1.2 cm/h et k2 = 26.16 cm/h pour la mare de Wankama
- k1 = 1.2 cm/h et k2 = 3.6 cm/h pour la mare de Bazanga.

Ce calcul a été réalisé pour l'ensemble des hauteurs d'eau observées, et la position du seuil de perméabilité, pour chaque mare, a été établi en calculant sa hauteur moyenne sur l'ensemble des décrues observées.

Desconnets obtient les résultats suivants (figs. page de gauche) : de façon générale, l'augmentation de la perméabilité équivalente avec la hauteur d'eau dans la mare est bien mise en évidence au-dessus de la zone colmatée.

Les deux mares ont une évolution semblable de la perméabilité : le passage entre la zone envasée et les niveaux non colmatés est franc et passé cette limite, elle **augmente très rapidement** puis tend à se **stabiliser** vers une valeur maximum dans les niveaux les plus hauts.

mare de Wankama

hauteur d'eau / taux d'évaporation



mare de Bazanga

hauteur d'eau / taux d'évaporation



mare de Kafina

hauteur d'eau / taux d'évaporation



taux initiaux = taux finaux

Pour établir une comparaison avec la mare de Kafina, nous avons pris les valeurs k1 et k2 de Wankama en supposant que le sol des deux mares est assez proche.

On remarque alors une évolution un peu différente de la perméabilité pour la mare de **Kafina** : le seuil d'envasement est bien marqué, mais la perméabilité **augmente progressivement** en quittant la zone colmatée.

Il faut rester prudent avec ces résultats. En effet ils dépendent beaucoup des valeurs retenues pour k colmaté et k non-colmaté. Ainsi on s'abstiendra de comparer la perméabilité globale de Kafina avec celle des deux autres mares : les sols de Wankama et de Kafina sont-ils vraiment similaires ? Sûrement pas. De plus *Rawls (1983)* considère une perméabilité de 1.2 cm/h pour la zone colmatée des mares alors qu'on a vu que cette perméabilité pouvait être nulle.

• Taux d'évaporation :

í

On peut aussi décrire le fonctionnement hydrologique des mares en établissant une relation entre la hauteur d'eau initiale et finale des épisodes de vidange et leurs taux d'évaporation respectifs (les taux d'évaporation correspondent au rapport du flux d'évaporation sur le flux de vidange total (infiltration et évaporation)).

A une hauteur donnée et un instant d'un épisode de vidange quelconque correspond un taux d'évaporation instantané. On a porté dans les <u>diagrammes de la page de gauche</u>, les valeurs de ces taux pour le début et la fin de chacun des épisodes de vidange, en fonction donc de la hauteur d'eau dans la mare.

On distingue pour les mares de **Wankama** et de **Bazanga** une **transition brutale** entre deux zones : une zone où le taux d'évaporation reste faible (inférieur à 10 % pour les deux mares) et n'augmente que très lentement quand le niveau de la mare diminue, et une zone où au contraire le taux d'évaporation augmente très rapidement lorsque le niveau de la mare décroît (dans quelques cas l'évaporation devient prédominante sur l'infiltration (plus de 50 %)). Cette transition rapide correspond au passage du **seuil de perméabilité** déjà évoqué.

Pour Wankama ce seuil oscillerait entre 4 m et 4.5 m (hauteur lue sur l'échelle), alors que pour **Bazanga**, la limite est beaucoup plus franche et avoisine la cote de 3.02 m.

Pour la mare de **Kafina**, bien que l'on perçoive ici aussi deux zones à régime d'évaporation différent, il est impossible de définir précisément un seuil, les épisodes de vidanges mesurés n'étant pas assez nombreux (seulement trois ans de mesures).

Les valeurs des taux d'évaporation calculées pour chacune des zones doivent être interprétées avec prudence car on considère ici une évaporation moyenne dont l'évaporation journalière peut s'écarter significativement. De plus, pour les faibles hauteurs de la mare, l'incertitude sur les flux de vidange est assez forte, ce qui explique la forte dispersion verticale des points dans la partie gauche des graphes.

Par contre les ordres de grandeurs restent valables, en régime rapide, c'est à dire lorsque le niveau de la mare est au-dessus du seuil de perméabilité, le taux d'évaporation reste inférieur à 10 % pour Bazanga et Wankama. Au cours de ce régime, une estimation même grossière du flux d'évaporation aura peu d'influence sur l'estimation du flux d'infiltration.

Dans la zone de transition, une évaluation précise des deux flux est assez délicate car ils sont du même ordre de grandeur. La fréquence du passage du plan d'eau dans cette zone aura donc une certaine importance pour évaluer la précision des calculs des bilans.

Enfin, le régime de vidange lent, lorsque le taux d'évaporation devient supérieur à 50 %, n'est observé que lors de longues périodes sèches entre deux épisodes pluvieux ou en fin de saison des pluies, au cours de l'assèchement total.



• <u>Deux régimes</u> :

Nous allons donc chercher à apprécier la fréquence de fonctionnement dans chacun des deux régimes dominants.

Les diagrammes des vidanges de chaque mare, présentés dans la <u>figure de gauche</u> donne une vue rapide et simplifiée de chacun des épisodes de vidange : chronologie, amplitude, niveau initial, et niveau final pour toutes les années de mesure. Le seuil hydrologique moyen est positionné sur chacun des diagrammes et permet ainsi de matérialiser la limite théorique d'un régime rapide à un régime lent. (tab. 7)

	Wankama	Bazanga	Kafina
Phase rapide de vidange	75 %	60 %	35 %
Phase lente de vidange	25 %	40 %	65 %

<u>Tableau 7:</u> importance relative en terme de volume vidangé des deux phases de régime pour les trois mares

Bien que les trois mares aient un fonctionnement hydrologique semblable (régime de vidange à deux vitesses), la **phase rapide** est largement plus privilégiée dans la mare de **Wankama**, elle représente **75 %** du phénomène de vidange sur l'ensemble des épisodes mesurés. Pour **Bazanga**, la phase rapide prédomine aussi et représente **60 %** du processus de vidange.

Desconnets (1994) a noté dans sa thèse, que pour un curnul pluviométrique similaire et une distribution saisonnière des pluies assez proche, les bilans hydrologiques de la mare de Wankama et de Bazanga étaient très différents en 1992. La phase lente pour la mare de Bazanga (évaporation dominante) représentait 53 % du processus de vidange, et seulement 6 % pour Wankama.

Desconnets en déduit que la réponse hydrologique d'une mare à déstocker rapidement semble être à la fois déterminée par la morphologie de sa cuvette et par la superficie de la zone colmatée en regard des surfaces inondées par les crues.

Kafina se rapproche assez de Bazanga pour la forme circulaire de sa cuvette, et bien qu'elle reçoive deux fois moins de pluie en moyenne que Bazanga sur une période de trois ans, Kafina présente un cumul en eau arrivée à la mare légèrement supérieur. Pourtant, sa phase de régime lent domine largement son processus de vidange, avec un taux de 0.65 sur les trois années de mesure.

Le début de colmatage au-dessus de la cuvette envasée, mis en évidence dans le paragraphe 4-a, semble être l'explication d'une telle différence entre les réponses hydrologiques de ces deux mares.

69

•
6. TRANSFERT DES EAUX DE SURFACE VERS LE DOMAINE SOUTERRAIN

• Transfert à partir des mares de plateau (Bazanga)

Nous reprendrons ici la synthèse sur ce sujet de Desconnets (1994) :

« Comme le montre, d'une part, les profils d'humidité réalisés aux abords de la mare durant la période la plus humide de la saison et, d'autre part, l'importance relative des flux globaux sortant de la mare, les transferts d'eau à partir de tels systèmes vers le souterrain doivent être très limités en terme de flux. Par ailleurs l'existence de la cuirasse associée à une épaisseur de plus de 60 mètres de sédiments tertiaires, à l'intérieur desquels les flux descendants sont très lents, limitent les transferts de manière considérable, soit à des profondeurs proches de la surface, soit à de longues périodes de transfert pour atteindre et recharger l'aquifère. Les faibles variations piézométriques enregistrées sur quelques puits situés sur les plateaux en témoignent.

Enfin, les volumes infiltrés, inférieurs à 20 000 m^3/an d'après le bilan de la mare, mettent en évidence la faible contribution de la mare à une recharge éventuelle de la nappe. »

• Transfert à partir des mares de cours d'eau

Les premiers résultats concernant le rôle des mares dans le bilan hydrologique régional (*Desconnets et al, 1993*) ont montré que les mares de vallée, de par le contexte pédologique de surface et de profondeur et leur régime hydrologique, étaient un lieu privilégié d'infiltration et de recharge de l'aquifère (Leduc et Desconnets, 1994).

Evolution des niveaux piézométriques à la mare de Wankama:

A partir des données enregistrées en 1993 sur les hauteurs d'eau dans la mare et les niveaux piézo métriques de la nappe sous-jacente S. Massuel (comm. pers.) a quantifié le décalage entre le début de la crue dans la mare et celui de la montée de la nappe.



Figure 55: Délais avant la réponse de la nappe, après une crue

Ce délai a tendance à diminuer au cours de la saison. Ainsi, le décalage du signal au niveau du piézomètre P2 était de 360 minutes pour la pluie du 22 juillet, de 240 minutes le 17 août et a chuté à 105 minutes pour la pluie du 03 septembre (fig. 55).

Sans les erreurs de mesures nous devrions trouver un temps constant entre les deux piézomètres.



<u>Figure 56:</u> Variation du niveau piézométrique sous la mare de Wankama (93) Piézomètre n°2

année	date de la réponse de la nappe	délais entre la première pluie et la montée significative de la nappe (jours)	nbres de vidanges avant la réaction de la nappe	volume infiltré à partir de la zone perméable (m ³) avant la réaction de la nappe		volume total infiltré (m ³) avant la réaction de la nappe	
93	14 août	61	1 2 3 4 5	1 025 1 306 0 3 560 816	6 707	8 532	
94 25 juillet		37	1	5 021	14 696	16 239	
95	08 août	44	1 2 3 4	9 873 0 2 057 7 875 0	9 932	13 316	
96	13 août	65	1 2 3 4 5 6	3 487 0 611 3 775 849	8 722	18 209	
97	07 juillet	0	1	0	0	0	
98	01 août	65	1 2 3 4	0 10 151 2 311 739	13 201	19 751	
99	24 juin	0	0	0	0	0	

Tableau 8: synthèse décrue/réponse de la nappe à Wankama

Malheureusement il nous est impossible de confirmer ce mode de fonctionnement car comme nous l'avons déjà fait remarquer, les relevés du niveau piézométrique enregistrés à partir de 1994 sont trop imprécis pour obtenir une mesure fiable de ce délai.

- En 1993, (tab. 8) le niveau de l'aquifère mesuré par les trois piézomètres est resté inchangé jusqu'au 21 juillet (fig. 55). Les premières crues du 13 et 16 juin n'ont pas affecté la nappe. Cependant, les crues suivantes ont été perceptibles (moins de 10 cm par crue) jusqu'au 13 août, date à partir de laquelle le niveau de l'aquifère est monté significativement (45 cm le 14/08, 3.2 m le 22/08 et 2.5 m le 3/09). Ces variations de forte amplitude correspondent aux deux plus fortes crues de l'année : 35 000 m³ le 22 août et 40 000 m³ le 03 septembre qui, en surface, ont provoqué d'importantes infiltrations dans les matériaux sableux.
- En 1994, le niveau piézométrique commence à évoluer au cours de la pluie du 22 juillet et sa montée devient significative avec la pluie du 25 juillet (près de 4 m). Si on ealcule la quantité d'eau infiltrée à partir de la zone perméable de la mare, pour la date du 25/07, on obtient un volume de 14 700 m³.
- ► En 1995, on retrouve la même évolution de la nappe. La montée du niveau piézométrique commence 44 jours après la première pluie avec un volume d'eau infiltré à partir de la zone perméable de 9 950 m³.
- Pour l'année 1996, 18 200m³ d'eau se sont infiltrés à partir de la mare (seulement 8 700 m³ par la zone non-colmatée avec la dynamique de vidange rapide) et c'est à la faveur d'une grosse crue le 13 août que la nappe a réagi.
- En 1997 par contre, la réponse de la nappe est instantanée (quelques heures seulement) et fait suite à une crue (la première de la saison le 07/07) particulièrement importante (le niveau de la mare est monté jusqu'à la cote 5.65 m donc largement au-dessus de la zone colmatée). En tout pour cet épisode plus de 47 000 m³ se sont infiltrés.

On observe une seconde montée du niveau piézométrique (1.50 m) après une seconde crue très intense (hauteur d'eau dans la mare lue sur l'échelle de 5.63 m et un volume infiltré de 50 000 m³).

- En 1998, la nappe monte de façon notable le 01 août, 65 jours après la première pluie. Avant ça, 13 201 m³ d'eau se sont infiltrés par les niveaux sableux de la mare. On remarque aussi une légère réponse de la nappe à la pluie du 08 juin avec un peu plus de 10 000 m³ d'eau infiltrés à partir de la zone perméable.
- ► Enfin en 1999, on retrouve le même processus qu'en 1997 avec une très forte crue dés le début de la saison. Le niveau de la mare a atteint 5.35 m à l'échelle et la nappe est montée d'un mètre quelques heures plus tard.

Le 06 août, une seconde crue très importante (5.51 m à l'échelle) fait grimper le niveau piézométrique de plus de trois mètres.

Schéma de fonctionnement :

D'après l'étude menée par J.C.Desconnets (1994), l'avancée moyenne du front d'humectation dans la zone non saturée juste sous la mare, calculée à partir d'un suivi neutronique (profils d'humidité), a été estimé à 20 cm par jour pour les premières crues. Cette valeur, comparée à la profondeur de la zone saturée sous la mare (15 mètres) est cohérente avec la période de deux mois nécessaire pour avoir une réaction rapide de l'aquifère en cette saison.

En effet on retrouve cette période de deux mois avant la réaction de la nappe pour les années 93, 96 et 98. Pour les années 94 et 95 ce temps est plus court (37 et 44 jours), cela peut provenir de conditions initiales d'humidité du sol différentes.



Figure 56: schéma des modalités de transfert de la mare vers la nappe, cas de la mare de Wankama

i

Ces observations nous conduisent à distinguer deux phases dans le transfert des eaux de surface vers l'aquifère (fig. 56 tirée de la thèse de *J.C.Desconnets*):

- une phase de remplissage du réservoir intermédiaire (zone non saturée) dont la durée dépend à la fois des conditions d'humidité initiale, puis des volumes s'infiltrant à partir de la mare et principalement à partir de la zone perméable. Au cours de cette phase, le transfert se fait donc par drainage vertical et la réaction de l'aquifère est minimale et retardée ;

- une phase de réaction rapide où l'infiltration en surface est répercutée avec un retard inférieur au temps de drainage nécessaire pour traverser le réservoir intermédiaire qui est alors saturé en permanence. Le transfert de l'eau se fait alors par «effet piston». La variation de niveau piézométrique est forte et brusque et c'est donc principalement au cours de cette phase que la recharge locale de la nappe se fera.

Par contre, les réponses immédiates de la nappe dès les premières crues pour les saisons 97 et 99 ne correspondent pas à ce schéma et l'invalide complètement. Ce comportement de la nappe reste inexpliqué aujourd'hui.

74

75

Į

7. CONCLUSIONS :

L'inventaire des mares dans la zone d'étude, a permis d'identifier plus d'une soixantaine de mares temporaires (Desconnets, 1994). Elles sont réparties préférentiellement sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse (39), les lits des anciens cours d'eau actuellement non fonctionnels (11) et les bas-fonds de vallée verrouillée par les sables (6).

Les trois types d'endoréisme correspondant à ces trois situations géomorphologiques présentent des caractéristiques pédologiques, morphologiques, et géologiques bien distinctes dont les principales sont les suivantes :

- endoréisme de plateau : avec un bassin versant de faible dénivelé (< 3 m) et n'excédant pas 1 km2, assis sur une cuirasse ferrugineuse compacte à faible profondeur, et une mare tapissée par une couche de sédiments sablo-argileux colmatants (plus de 50 % de la superficie de la cuvette), d'une capacité volumique d'une dizaine de milliers de m³.

- endoréisme de vallée (mare installée dans les lits de cours d'eau) : avec un bassin versant de superficie variable, 0.5 à 3 km2, avec une dénivelée supérieure à 20 m, assis sur quelques mètres de sédiments sableux et une mare d'une capacité volumique de plusieurs dizaines de milliers de m3 tapissée par une couche de sédiments argilo-sableux colmatants (moins de 10 % de la superficie totale de la cuvette).

- endoréisme de cuvette : avec un bassin versant aux caractéristiques identiques au précédent mais drainant des surfaces nettement plus étendues (de l'ordre de 10 km2) et une mare d'une capacité volumique d'une dizaine à une centaine de milliers de m^3 et ayant une couche colmatante nettement inférieur à 10 % de la superficie du lit.

- Quel que soit le type de mare, la **dynamique de vidange**, lors une crue, peut être divisée en deux phases :
- <u>une phase à cinétique rapide</u>, au dessus de la zone colmatée, dans la zone perméable, avec l'infiltration comme processus principal.
- <u>une phase à cinétique lente</u>, où l'évaporation est le terme principal, correspondant au déstockage dans les zones colmatées.

L'extension latérale et verticale des sédiments argileux qui tapissent le lit de la mare joue donc un rôle déterminant dans la distribution de ces deux phases : le régime des mares de plateau est en effet caractérisé par des taux de vidanges instantanés allant de 1 à 15 cm/j alors que les mares de vallée installées sur des matériaux plus perméables ont des vitesses de vidanges nettement plus élevées pouvant atteindre plus de 160 cm/j.

Si la limite entre les niveaux envasés et les niveaux perméables ne varie pas au cours d'une saison pour les mares de plateau, la zone colmatée, au fond des mares de vallées, semble quant à elle s'étendre avec la succession des pluies. Le réseau hydrographique étant quasiment inexistant sur les plateaux, peu de sédiments sont charriés jusqu'aux mares par les eaux de ruissellements. Par contre dans les fonds de vallées, lors d'une crue, les eaux empruntent avant d'arriver à la mare un réseau hydrographique déjà existant et transportent beaucoup de sédiment ce qui contribue à l'envasement progressif du fond de la mare.

• La présence d'une induration ferrugineuse au sommet des plateaux apparaît comme le facteur limitant de la **redistribution des eaux d'infiltration** vers les niveaux inférieurs. Le stockage des eaux dans les niveaux superficiels alimente essentiellement le cordon de végétation lié à la mare. La densité et le développement exceptionnels de certaines espèces arborées attestent de l'importance de la reprise évapotranspiratoire (*J.C. Desconnets, 1994*).

Dans les mares installées dans les lits des cours d'eau, la majeure partie des volumes d'eau percole à travers les sédiments sableux et vont réalimenter la nappe phréatique et c'est essentiellement les volumes infiltrés dans les zones imperméables qui contribuent à la recharge de l'aquifère.

77

ļ

8. BIBLIOGRAPHIE

Courault D., d'Herbes J.M., Valentin C., 1990: Le bassin versant de Sama Dey. Premières observations pédologiques et phytoécologiques (programme Hapex-Sahel). Rapport ORSTOM-Bondy, pp. 1-31.

Courel M.F., 1984 : Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'état ès lettres et sciences humaines. Université de Paris I. 407 p.

Desconnets J.C., Taupin J.D., Lebel T., 1993 : Le rôle des mares dans le bilan hydrologique d'une région sahélienne, in Bolle H-J., Feddes, R.A. and Kalma J. (editors). Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales AIHS Pybl. n°212, pp 299-311.

Desconnets J.C., 1994 : Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (Niger-degré carré de Niamey) Thèse de Doctorat. Université de montpellier II. 325 p.

Favreau G., 1996 : modélisation locale de la recharge de » la nappe sur le site de Wankama (sudouest du Niger). Mémoire de DEA. Université de Paris-sud. 75 p.

Greigert J., 1966 : Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Illumenden (Afrique Occidentale, mémoire BRGM, 208 pages.

Greigert J., Pougnet R., 1965 : Carte géologique de la République du Niger au ½ 000 000°, BRGM, Paris.

Leduc C., Desconnets J.C., 1994 a : Pools and recharge of the continental Terminal phreatic aquifer near Niamey, niger. In : Groundwater monitoring and recharge in semi-arid areas, Proc. International workxhop Hyderabad, UNESCO-IAH, pp SV13-SV22.

Leduc C., Desconnets J.C., 1994 b: Variability of groundwater recharge in sahelian climate: piezometric survey of the Continental terminal aquifer near Niamey (Niger). in : Future Groundwater Ressource at Risk, Prod. Helsinki conference, IAHS publ. n°222, pp 505-511.

Massuel S. (à paraître) : Etude sur la cinétique de transmission de la crue mare/nappe (mare de Wankama, niger). Premiers résultats, 8p.

Nagumo F., 1992: Pedological environment and agro-ecological system of the Sudano-Sahelian zone, in West Africa. Mémoire de fin d'étude, Graduate School of environment sciences, Hokkaido University, Japan. 75 p.

Peugeot C.,1995 : Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant sahélien (Niger). Expérimentations in-situ et modélisation. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier.356 p.

Philip J.R., 1992 a: Falling head ponded infiltration. Water Resources Research, vol. 28 n°8 :pp 2147-48.

Philip J.R., 1992 b: Falling head ponded infiltration with evaporation. journal of Hydrologie, 138 (1992): pp 591-598.

Pouyaud B., 1986 : Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Exemples du lac de Bam et de la mare D'oursi (Burkina-Faso), du lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien. Thèse de doctorat d'état ès sciences naturelles. Université Paris-sud. collection Etude et Thèses, Ed. ORSTOM, Paris. 254 p.

Rawls W.J., Brakensiek D.L., Miller N., 1983 : Green-Ampt prameters from soil data. Am. Soc. Civ. Eng., Vol 109 n°1, pp 62-70.

Rodier J.A, 1975 : Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Coll. Travaux et documents de l'ORSTOM. Ed. ORSTOM. 121 p.

Taupin J.D., Amani A., Lebel T., 1993 : Small scale spatial variability of the annual rainfall in the Sahel. In : Eschange processes at the land surface for a range of space and times scales (H.J. Bolle, R.A. Feddes, J.Kalma ed.), Prod. Yokohama Symp., IAHS publ. n°212, pp 593-602.

9. ANNEXE

Evaporation :

Nous avons retenu un taux moyen d'évaporation par mois, calculé sur une moyenne de 10 ans, à partir des relevés de la Station de Sadoré (mesure in situ sur bac de classe A).

A ces taux moyens, nous avons appliqué la relation empirique de Pouyaud (1986) reliant l'évaporation d'un bac de classe A et d'un lac.

Relation de Pouyaud : Elac=1.6 Ebac^(0.6) en mm/j. Elac : évaporation du lac en mm/j Ebac : évaporation du bac en mm/j

nous obtenons pour notre période d'étude, les taux corrigés suivant :

mois	Moyenne journalière mm/j	Moyenne journalière corrigée mm/j		
Juin	7.38	5.3		
Juillet	5.64	4.5		
Août	4.59	3.9		
Septembre	4.88	4.1		
Octobre	6.03	4.7		
Novembre	7.06	5.1		
Décembre	6.73	5.0		

Relation hauteur - volume :

Les relations hauteur-volume sont ajustés à des modèles statistiques de type polynomiale d'équation suivante : 5

avec V(h) le volume d'eau en m³ pour la hauteur h h la hauteur d'eau en mètres A, B, C, D, E et F les coefficients ajustés.

le domaine de validité correspond à l'intervalle des hauteurs d'eau dans lequel les coefficients ajustés sont utilisés. Le point de référence (h=0) est donné par rapport à la cote 0 de l'échelle limnimétrique.

Pour	Bazanga.
------	----------

Domaine de validité	0.2 - 0.34 m	0.35 - 0.69 m	0.7 - 0.88 m	0.89 - 1.04 m	1.05 - 1.4 m
A	-54.2	-276.64	3 256.1	6254.4	-2594.5
В	-509.3	2213.40	-11 825.0	-18611.0	-3580.0
C	1219.3	-6513.40	11 670.0	15513.0	9184.7
D		7615.20			

Pour Kafina							
ne							
5							
44							
93							
54							
27							
12							
08							
15							
32							
59							
97							
45							
03							
72							
50							
88							
37							
6							
6							
5							
4							
33							
0							
8							
4							
9							
34							
7							
'9							
0							
1							
3							
4							
4							
1							
7							
0							
0							
8							
3							
5							
5							
2							
7							
9							
8							

7

.)

 $\left[\right]$

. ___]

]

]

]

1	Pour War	kama							
1	échelle	Volume	surface	échelle	Volume	surface	échelle	Volume	surface
	m	m3	m2	m	m3	m2	m	m3	m2
	6.02	82 985	82 482	4.8	10 455	29 412	3.58	1 195	3 325
7	5 98	79 720	80 821	4.70 4.76	15 077	20 424	3.50	1 067	3 191
	5.96	78 111	80 021	4.70	14 774	26 771	3.54	1 007	2 944
	5.94	76 518	79 223	4.72	14 246	25 976	3.5	949	2 818
)	5.92	74 942	78 446	4.7	13 734	25 249	3.48	894	2 7 1 5
$\left \right $	5.9	73 381	77 651	4.68	13 235	24 587	3.46	841	2 602
`	5.88	71 836	76 867	4.66	12 750	23 924	3.44	790	2 483
7	5.86	70 306	76 094	4.64	12 279	23 180	3.42	742	2 365
{	5.84	68 793	75 308	4.62	11 822	22 529	3.4	695	2 268
1	5.82	67 295	74 467	4.6	11 378	21 861	3.38	651	2 169
ור	5.8 5.70	64 240	73 00/	4.58	10 948	21 1/1	3.30	5008 567	2 080
$\left(\right)$	5.76	62 902	71 880	4.50	10 332	19 723	3 32	528	1 992
'	5.74	61 474	70 935	4.52	9 743	18 947	3.3	491	1 831
7	5.72	60 066	69 840	4.5	9 372	18 085	3.28	455	1 745
	5.7	58 683	68 429	4.48	9 0 17	17 417	3.26	421	1 677
.1	5.68	57 330	66 885	4.46	8 675	16 797	3.24	388	1 604
٦	5.66	56 009	65 214	4.44	8 345	16 225	3.22	357	1 530
{	5.64	54 719	63 864	4.42	8 026	15 706	3.2	327	1 459
.1	5.62	53 453	62 680	4.4	7 716	15 263	3.18	299	1 384
7	5.0 5.59	52 211	60 533	4.38	7 4 15	14 828	3.10	272	1 293
	5.56	49 789	59 557	4.30	6 842	13 816	3.14	247	1 142
,	5.54	48 609	58 513	4.32	6 571	13 321	3.1	201	1 074
2	5.52	47 448	57 585	4.3	6 310	12 797	3.08	180	1 012
ſ	5.5	46 304	56 749	4.28	6 059	12 249	3.06	161	942
J	5.48	45 178	55 863	4.26	5 819	11 808	3.04	143	880
1	5.46	44 070	54 999	4.24	5 586	11 451	3.02	126	817
	5.44	42 978	54 132	4.22	5 361	11 082	3	110	750
ì	5.42	41 904	53 244	4.2	5 143	10 753	2.98	96	682
ו	5.4	40 848	52 417	4.18	4 931	10 434	2.90	83 71	621 551
	5.36	38 784	50 699	4.10	4 7 20	9745	2.94	60	503
J	5.34	37 779	49 828	4.12	4 336	9 381	2.9	51	455
1	5.32	36 790	49 125	4.1	4 152	9 021	2.88	42	404
	5.3	35 814	48 416	4.08	3 975	8 664	2.86	35	360
	5.28	34 853	47 705	4.06	3 805	8 316	2.84	28	304
1	5.26	33 906	46 961	4.04	3 642	8 007	2.82	22	265
	5.24	32 974	46 204	4.02	3 485	7 722	2.8	17	221
J	5.22	32 057	45 484	2 09	3 333	7 435	2.78	13	180
1	0.Z	30 267	44 740	3.90	3 100	6 837	2.70	7	100
	5.10	29 395	43 227	3.94	2 9 1 4	6 596	2.72	5	74
J	5.14	28 539	42 331	3.92	2 784	6 384	2.7	4	56
1	5.12	27 702	41 378	3.9	2 659	6 146	2.68	3	41
	5.1	26 885	40 391	3.88	2 538	5 899	2.66	2	30
	5.08	26 084	39 645	3.86	2 423	5 649	2.64	2	21
,	5.06	25 299	38 934	3.84	2 312	5 447	2.62	2	8
	5.04	24 527	38 183	3.82	2 205	5 266	2	0	0
1	5.02		37 334	3.8	2 101	5 065			
1	C 90 M	23 034	30 489	3.78	1 007	4 669			
	4.90	22 311	34 966	3.70	1 815	4 000			
J	4.94	20 913	34 209	3.72	1 727	4 319			
1	4.92	20 236	33 485	3.7	1 643	4 153			
	4.9	19 573	32 798	3.68	1 561	4 0 1 6			
J	4.88	18 923	32 153	3.66	1 482	3 863			
1	4.86	18 286	31 541	3.64	1 406	3 731			
	4.84	17 662	30 870	3.62	1 333	3 585			
1	4.82	17 051	30 180	3.6	1 263	3 451			