

Le rôle des mares dans le bilan hydrologique d'une région sahélienne

J.C. DESCONNETS, J.D. TAUPIN, T. LEBEL

ORSTOM, mission au Niger, BP 11416, Niamey, Niger

Abstract L'hydrologie de surface sahélienne est caractérisé par la dégradation des réseaux hydrographiques qui implique qu'une grande partie des surfaces n'a pas de drainage externe. Ainsi, sur la zone d'expérience d'HAPEX-Sahel (10000 km² environ, région de Niamey-NIGER), plus d'un tiers du système de surface est endoréique dans des conditions hydrologiques normales. Lorsqu'elle s'opère, la concentration des eaux se fait donc dans des mares. Une étude de ces systèmes hydrologiques particuliers est en cours sur un sous-ensemble représentatif (600 km²). Elle s'appuie à la fois sur un examen détaillé du fonctionnement de mares "échantillons" (enregistrement des variations de niveau, analyses chimiques et isotopiques). Une première classification a été établie qui aboutit à distinguer les mares de plateau des mares de bas-fond. Ces dernières ne sont cependant pas totalement imperméables. Au dessus d'une certaine cote, les eaux accumulées dans la mare débordent de la zone argileuse qui tapisse le fond de la cuvette moyenne et elles s'infiltrant alors dans les sables environnants permettant ainsi une concentration locale d'eau dans la zone non saturée et favorisant une redistribution vers les nappes profondes. En terme de bilan, les mares de plateau jouent un rôle assez faible; par contre, les mares de bas-fond pourraient être un élément déterminant dans le processus de réalimentation des nappes donc, pour le bilan hydrologique à l'échelle régionale et la gestion des ressources en eau. L'extension de notre dispositif expérimental et la surveillance par photographie aérienne des mares du secteur d'étude seront deux outils d'intégration spatiale qui devraient confirmer et préciser le rôle des mares de bas-fond.

INTRODUCTION

La zone d'étude est caractérisée par un paysage au relief peu marqué. Il est constitué de plateaux à cuirasse ferrugineuse qui dominent des vallées sableuses où les piémonts et les bas-fonds se distinguent par l'existence d'un important micro-relief.

L'agressivité climatique des pluies et du vent conjugués ainsi que les caractéristiques physiques du milieu tel que le relief et la couverture pédologique sont



autant de facteurs qui entraînent la dégradation du réseau hydrographique dans cette région. Ainsi, l'hydrographie se présente sous la forme d'une mosaïque de petits bassins versants endoréiques. Durant la saison des pluies, l'écoulement de surface, très sporadique, se concentre dans les nombreuses dépressions du paysage et donne naissance à un nombre important de mares de taille réduite (de l'ordre de l'hectare).

Une première classification des mares, grâce à des critères simples tels que leur situation dans le paysage et leur taille, a permis d'identifier deux grands types de mare:

- les mares situées sur les plateaux à cuirasse ferrugineuse se trouvant dans des dépressions imperméables peu étendues et de forme plate,
- les mares situées dans les bas-fonds des vallées sur matériau poreux plus ou moins colmaté par les alluvions (Desconnets et al.; 1992).

Cette étude a pour but d'identifier les différents types de systèmes endoréiques et leur fonctionnement spécifique et plus particulièrement:

- le stockage et déstockage de l'eau dans la mare au cours de l'année,
- le bilan hydrologique de la mare en quantifiant la reprise évaporatoire et la redistribution de l'eau dans la zone non saturée et/ou vers les nappes profondes,
- la régionalisation du bilan hydrologique des systèmes endoréiques.

METHODOLOGIE ET INSTRUMENTATION

Le premier volet de l'étude concernant l'examen détaillé du fonctionnement de chaque type de mare a été mené durant l'hivernage 1991 sur trois mares "échantillons". Après une étude préliminaire du milieu naturel du système endoréique dans sa totalité, chacun des sites a été instrumenté et suivi de la façon suivante:

- mesure des niveaux en continu par une sonde limnimétrique sensible reliée à une station d'acquisition,
- échantillonnage hebdomadaire de l'eau pour la détermination et le suivi des teneurs en anions, cations et isotopes stables (oxygène 18 et deuterium) durant l'hivernage et l'inter-saison,
- campagne de topographie des mares pour établir une relation "hauteur-volume" spécifique à chaque cuvette de mare, indispensable pour traduire l'enregistrements des niveaux en volumes d'eau.

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE LA MARE

Deux mares caractérisant les deux types de systèmes endoréiques ont été étudiées. Il s'agit d'une mare de taille moyenne (environ 1.5 hectare), localisée sur un plateau à cuirasse ferrugineuse et d'une mare de taille légèrement supérieure (environ 2 hectares) située dans un bas-fond encaissé d'une vallée sableuse.

Nous pouvons aisément décomposer le régime de la mare en deux périodes:

- une période de remplissage par les eaux de ruissellement qui correspond à la saison d'hivernage (mai à septembre),
- une période d'assèchement, généralement plus courte, durant le début de l'inter-saison (octobre à décembre).

Le régime de la mare durant l'hivernage

Le régime de la mare, pendant la saison des pluies, se caractérise tout d'abord par un remplissage de la cuvette par les eaux de ruissellement issues des versants de son système endoréique. Le remplissage est immédiatement suivi d'une phase de vidange qui apparaît comme le processus prépondérant dans la régulation du régime de la mare au cours de cette période.

D'après la figure 1, on constate qu'un fort pourcentage du volume de la crue, sinon la quasi-totalité (80% pour un événement exceptionnel), disparaît 72 heures plus tard. Ce régime de déstockage rapide atteint sa limite et tend à se stabiliser quelques 100 heures après l'événement hydrologique. Il est à noter que le phénomène n'est pas aussi fortement marqué pour tous les événements (20% à 80% de perte du volume selon la crue) et il apparaît plus faible pour les événements concernant la mare de plateau cuirassé. On peut constater, de plus, que l'intensité du phénomène (figure 2) va dépendre de deux paramètres essentiels:

- la forme de la cuvette de la mare. En effet, la mare de plateau présente une cuvette plate et étendue alors que la mare de bas-fond se trouve dans une cuvette nettement plus encaissée,
- l'importance de la montée de niveau induite par la crue. En effet, tous les événements conduisent à une baisse rapide du niveau de la mare, qui est encore plus intense pour les événements ayant provoqué une forte augmentation du niveau. Cette phase de vidange rapide est suivie d'un ralentissement allant vers une stabilisation du niveau d'eau. Ce ralentissement de la vidange est à relier directement à la présence d'un biseau limono-argileux, épousant la cuvette moyenne de la mare et qui est issu de la sédimentation des eaux et/ou de la néogénèse. Ce dernier joue un rôle de régulateur du niveau de la mare et le seuil de stabilisation correspond à la disparition de ces sédiments imperméables. L'intensité du déstockage sera donc réglée à la fois par l'encaissement de la cuvette et le dépassement du seuil de colmatage.

En terme de bilan des stocks d'eau, la position de ce seuil de colmatage déterminera le passage d'un régime de déstockage rapide à un régime de déstockage lent (régime d'évaporation essentiellement).

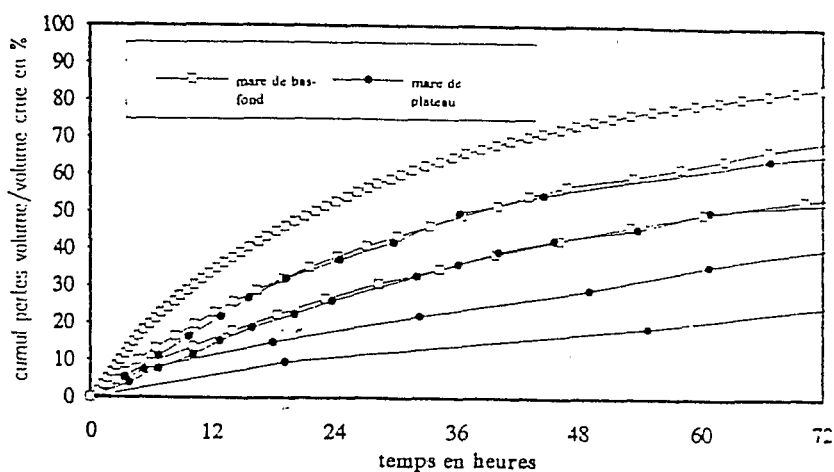


Fig. 1 Phase de déstockage rapide: volume infiltré en fonction du temps et pour deux types de mare.

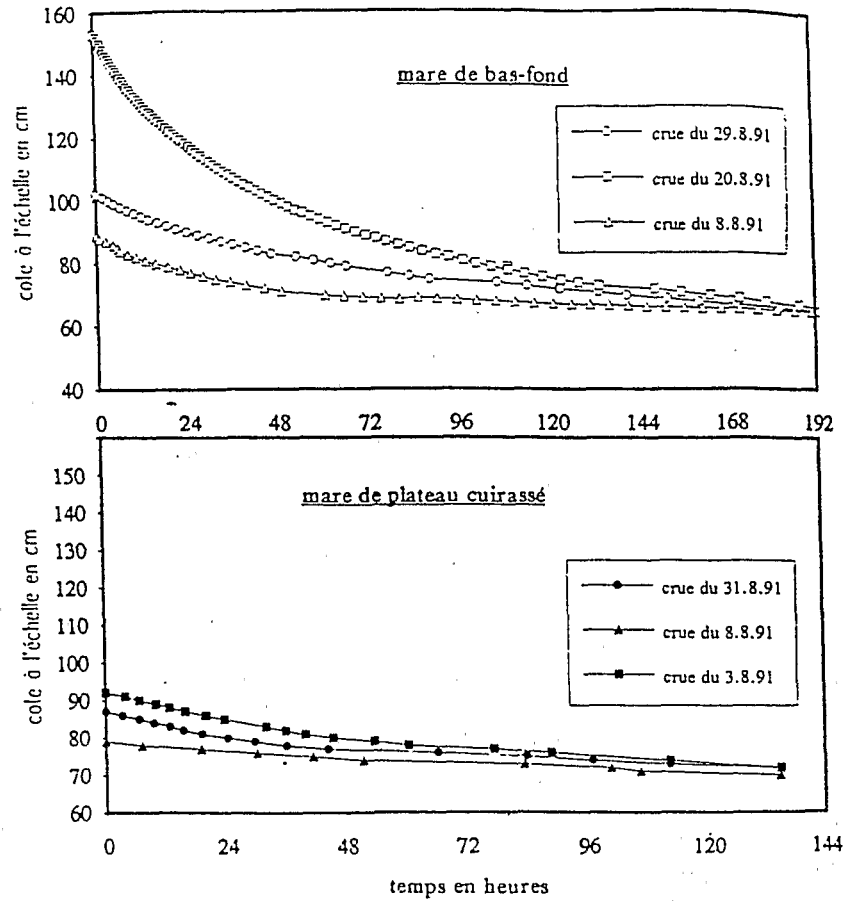


Fig.2 Variation du niveau de la mare durant la phase de déstockage rapide.

Importance du processus de vidange rapide dans le bilan de la mare

L'instrumentation n'ayant pu se faire qu'en milieu d'hivernage, la représentativité de ces mesures est critiquable si l'on considère que la série de mesures présentée n'inclue pas la totalité des événements ayant provoqué des écoulements de surface. Néanmoins, le bilan de la mare pour la période considérée est établi selon l'équation (1):

$$\text{pour } t \quad V = V_{\text{evap}} + V_{\text{inf}} \text{ ou } V_{\text{inf}} = V - V_{\text{evap}} \quad (1)$$

Nous émettons l'hypothèse que les pertes de volumes provoquées par l'alimentation animale et par l'évapotranspiration de la végétation proche de la mare sont négligeables dans l'intervalle de temps dt considéré et pendant tout l'hivernage. En effet, le cheptel de la région est énormément disséminé sur la multitude de mare existantes et la végétation est à un stade peu développé jusqu'à la mi-saison.

L'estimation de la lame d'eau évaporée est calculée à partir des lames évaporées mensuelles du bac de classe A de la station Niamey-aéroport et est corrigée par une relation empirique (2) proposée par Pouyau (1986) permettant de relier la lame

évaporée d'une surface d'eau libre à la lame évaporée mesurée sur un bac de classe A. Cette relation (2) est de la forme suivante:

$$ELAC = 1.664 \cdot ECLA^{0.602} \quad (2)$$

où ELAC est la lame mensuelle évaporée de la surface d'eau libre étudiée et ECLA est la lame mensuelle évaporée enregistrée au bac classe A.

Il ressort du bilan inter-cruce en volumes cumulés (figure 3) pour la période juillet-septembre, d'une part, que les volumes évaporés sont négligeables pour la majorité des événements de crue et d'autre part, que la part infiltrée est proportionnelle à l'importance de l'événement de crue. Ce bilan montre la fonction hydrologique de la mare comme réservoir très temporaire des eaux de ruissellement pour faciliter leur transit vers la zone non saturée.

La figure 4 présente le bilan global en volumes cumulés sur la période juillet-septembre 1991. Ils sont rapportés en pourcentage de la lame d'eau précipitée dans le tableau 1. Selon la mare, les volumes totaux varient d'un facteur 3. Cette

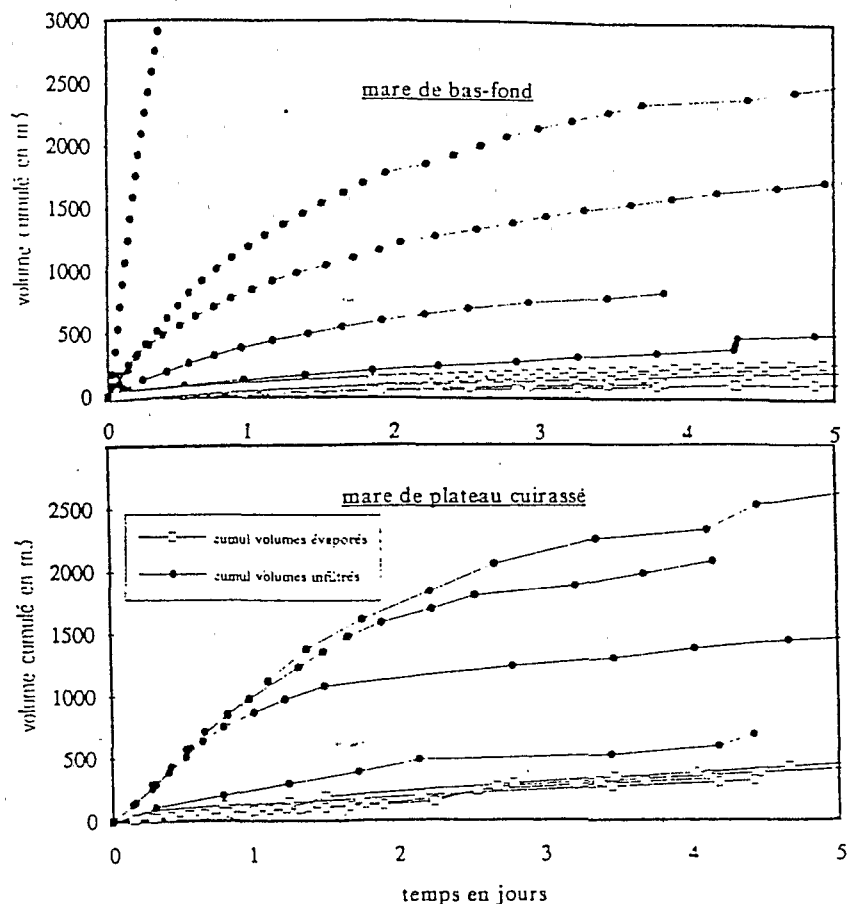


Fig. 3 Bilan hydrologique inter-cruce pour les deux types de mare - période juillet-septembre 1991 (événement exceptionnel le 20.8.91 volume cumulé: 10547 m³).

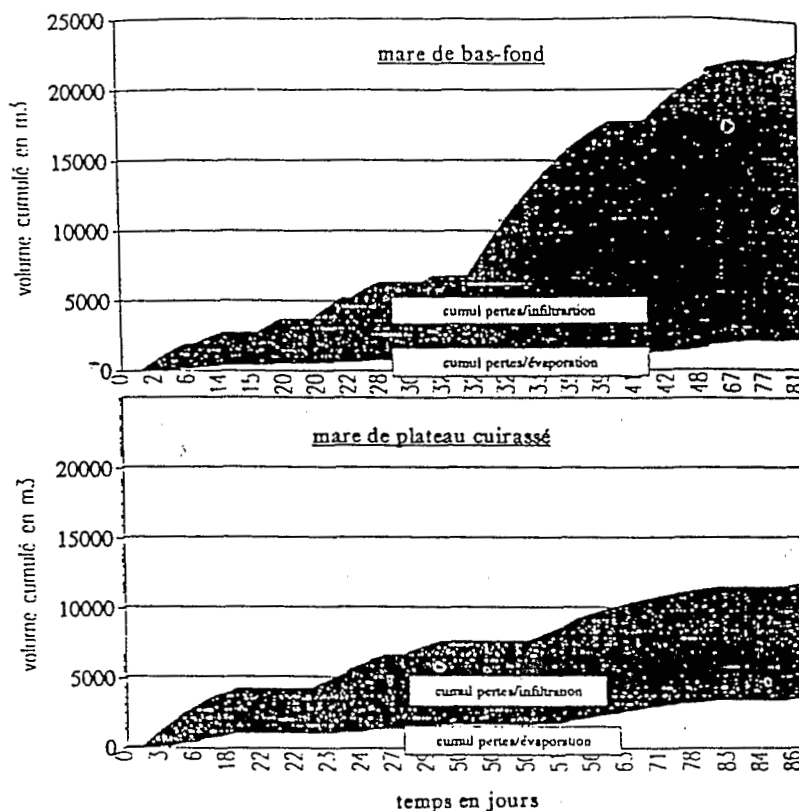


Fig. 4 Bilan hydrologique saisonnier pour les deux types de mare (juillet-septembre 1991).

constatation caractérise et différencie le système endoréique en terme de production de ruissellement et de superficie. Ceci est un caractère fondamental: les mares de plateau sont alimentées par des surfaces de faibles étendues, limitées aux abords du plan d'eau où la production d'écoulement est très importante. Par contre, les mares de vallée drainent des surfaces de l'ordre du kilomètre carré où la production d'écoulement est à la fois issue des bords des plateaux latéritiques et des glacis et piémont de vallée. La répartition des pertes en volumes dans le bilan saisonnier différencie une fois de plus les deux systèmes. Si la mare de plateau a un bilan à peu près équilibré en terme d'infiltration et d'évaporation, par contre, la mare de bas-fond présente un bilan où les pertes par infiltration constituent le terme majeur. Ce comparatif tend à montrer le rôle important des mares de bas-fond dans la redistribution de l'eau de surface dans le sol et le sous-sol.

Régime de la mare durant l'inter-saison

Suite au dernier événement et à sa vidange, les stocks d'eau des mares, en début de saison sèche, deviennent rapidement faibles en comparaison des apports globaux en saison des pluies. Le déstockage se fait de façon monotone jusqu'à l'assèchement total de la mare quelques mois plus tard.

Tableau 1 Bilan hydrologique saisonnier en volumes et en pour-cent de la lame d'eau précipitée.

	volume des apports en m ³	volume éaporé en m ³	volume infiltré en m ³	volume éaporé en % de la lame d'eau précipitée	volume infiltré en % de la lame d'eau précipitée
mare de plateau (bassin versant de 0.2 km ²)	11288	3282	8006	12.4	29.9
mare de bas-fond (bassin versant de 0.84 km ²)	22430	2273	20157	1.05	9.55

Néanmoins, si les conditions climatiques laissent présager un déstockage par évaporation et évapotranspiration uniquement, le bilan établi sur cette période (figure 5) montre que les deux reprises évaporatoires conjuguées ne peuvent expliquer les pertes de volumes, ceci est d'autant plus vrai pour la mare de bas-fond. La même démarche que précédemment a été appliquée pour calculer la part évaporée et celle infiltrée. En considérant que les calculs sont entachés d'une erreur due à une ponction d'eau non négligeable par le bétail et l'évapotranspiration des végétaux proches du plan d'eau, il se dégage de ces bilans deux processus de déstockage. Un fort pourcentage des pertes de volumes (environ 25%) sont imputables à l'infiltration pour la mare de bas-fond tandis que la mare de plateau semble être soumise essentiellement à l'évaporation. On peut se résumer en constatant l'existence de deux types de milieu, un milieu sableux, ouvert dans le bas-fond et un milieu latéritique peu perméable en surface et, à priori fermé (cuirasse ferrugineuse continue).

Néanmoins, il nous a semblé plus rigoureux d'utiliser d'autres méthodes d'appréciation et de quantification, telles que les méthodes chimiques et isotopiques, afin de préciser et valider le bilan hydrologique de la mare durant l'inter-saison.

ETUDE DU BILAN DE LA MARE PAR LES METHODES CHIMIQUE ET ISOTOPIQUE

Pour essayer d'une part, de vérifier l'exactitude des comparaisons des données bac évaporatoire - variation du niveau de la mare, montrant qu'une fraction importante du volume d'eau de certaines mares pourrait s'infiltrer au cours de la saison sèche, et d'autre part essayer de quantifier cette infiltration par d'autres méthodologies, l'étude

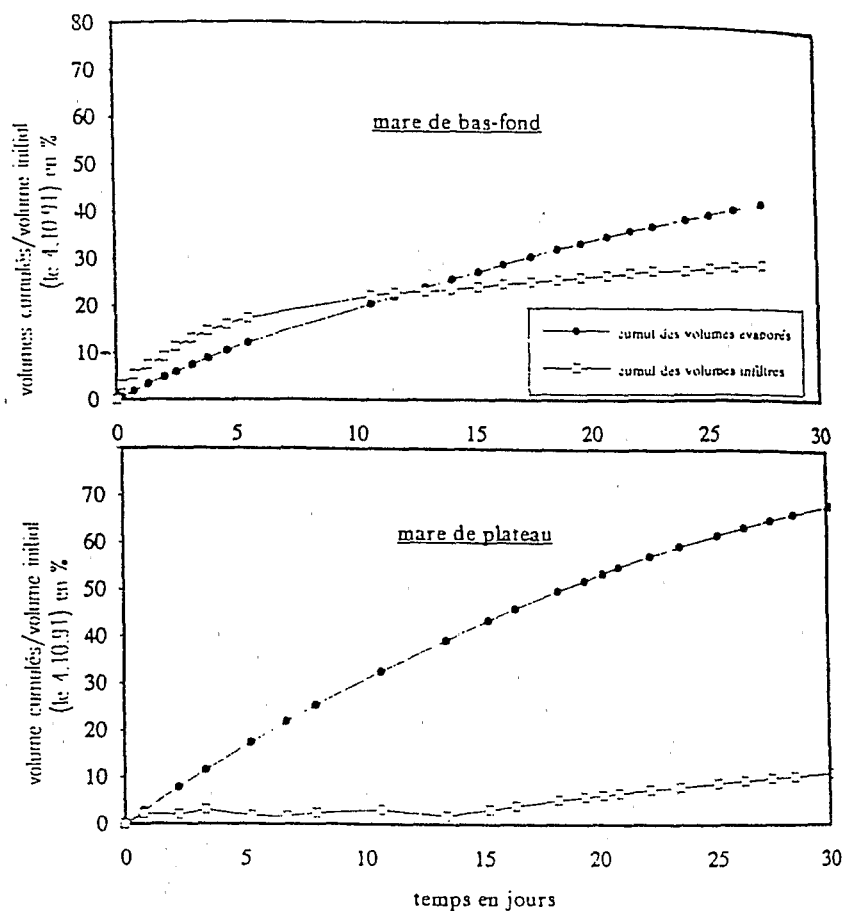


Fig. 5 Bilan hydrologique de deux types de mare en inter-saison.

a aussi porté sur la caractérisation de l'évolution géochimique et isotopique des eaux des mares au cours de la saison sèche. En effet le suivi chimique des mares qui apporte, des informations sur l'évolution du faciès chimique, sur les interactions eau-sol et sur les néoformations de minéraux lors de l'évaporation, permet aussi, si l'élément chimique est bien choisi, de suivre l'évolution de la fraction restante de l'eau de la mare en fonction de l'évaporation. L'élément choisi, dit conservatif, ne doit pas venir d'apport anthropique (déchets humains ou animaux, pollution diverses, lessivage de sol), et doit avoir un coefficient de solubilité (K_s) le plus élevé possible pour ne pas entrer dans des réactions chimiques de précipitation.

En période d'évaporation, les teneurs isotopique en oxygène 18 et deutérium de l'eau des mares vont s'enrichir au cours du temps. Cet enrichissement est dû uniquement au fractionnement isotopique entre la phase vapeur évaporée et la phase liquide restante et dépend de deux facteurs: un facteur d'enrichissement à l'équilibre dépendant de la température de l'air et un facteur d'enrichissement cinétique dépendant des paramètres de l'atmosphère (turbulence, température, humidité relative ...), cette méthode permet donc de suivre le phénomène évaporatoire sans signal interférent comme cela peut être le cas pour la méthode chimique.

Analyses chimiques

Les eaux des mares de la région en fin de saison des pluies ont une très faible minéralisation (entre 20 et 30 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) avec par contre une forte charge en M.E.S. constituée principalement de particules argileuses inférieures à $1\mu\text{m}$. Au cours de l'assèchement de la mare, le pH reste près de la neutralité (6.5 à 7.5), le faciès chimique fortement bicarbonaté alcalin en début de saison sèche, évolue vers un faciès chloruré alcalin en fin de saison sèche (figure 6). A partir des données de pH, température et teneur en élément, on a calculé par le programme WATEQF (Plummer et al., 1976) la distribution thermodynamique des différents minéraux en équilibre avec la solution au cours de la diminution de volume. Les diagrammes d'équilibre des silicates (figure 7) montrent qu'on est dans le domaine de stabilité de la kaolinite ce qui est le cas le plus courant pour des eaux de surface, mais on peut noter que l'évolution de la solution par évaporation tend à mener vers le pôle montmorillonite, il y aurait donc colmatage de la mare d'une part, par apport allochtone d'argile et d'autre part, par néogenèse de kaolinite et de smectite. Pour confirmer cette hypothèse et calculer l'apport de l'un et l'autre une étude fine de la fraction argileuse du fond des mares sera nécessaire. Les indices de saturation calculés par WATEQF montre que la solution reste toujours saturée vis-à-vis du quartz, le contexte sédimentaire étant très quartzueux. La calcite et la magnésite rentrent dans leur domaine de stabilité au terme ultime de l'évaporation.

D'après le contexte chimique environnant, les éléments conservatifs retenus à priori, dont les seuls apports sont d'origine météorique sont l'ion chlorure et l'ion sulfate. Il est apparu en fait que seul l'ion sulfate pouvait être utilisé car, les mares servant de point d'eau au bétail, les déjections animales, dont la teneur en chlorures est non négligeable, augmentaient artificiellement les teneurs en chlorures et.

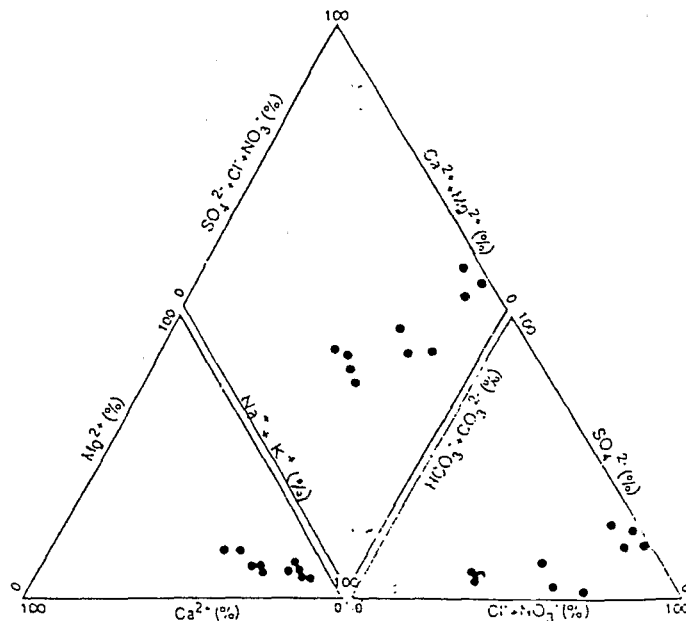


Fig. 6 Evolution chimique de l'eau des mares lors de la phase d'assèchement.

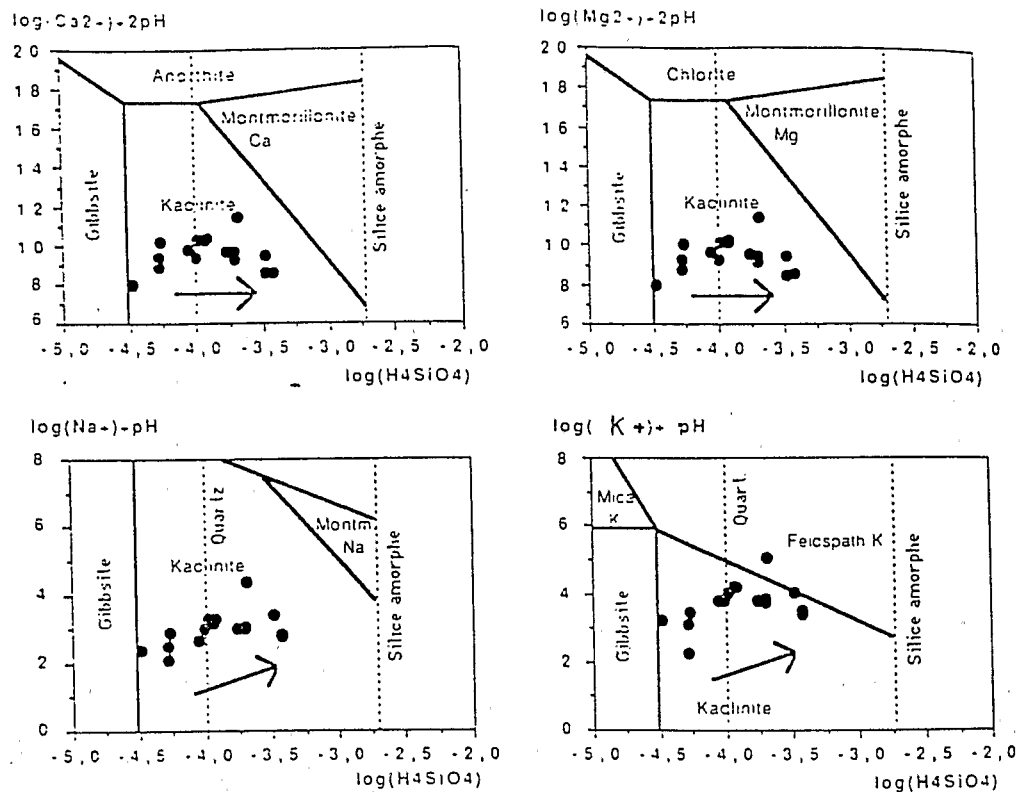


Fig. 7 Diagramme de stabilité des phases silicatés.

faussaient donc la mesure. On a comparé les teneurs en sulfates observées lors de l'assèchement de la mare avec les teneurs en sulfates que l'on devrait avoir si la diminution de l'eau n'était due qu'à l'évaporation (figure 8), on constate que pour la mare de plateau les deux courbes se confondent alors que pour la mare de bas fond les valeurs observées sont beaucoup plus faibles, les données chimiques confirment donc les données hydrologiques. Néanmoins, l'erreur de précision sur la mesure des teneurs en sulfates, qui pour la mare de bas-fond sont très faibles, ne permet pas véritablement d'estimer la quantité d'eau infiltrée.

Analyses isotopiques

Les teneurs en oxygène 18 et en Deuterium de l'eau des deux mares lors de leur assèchement (figure 9), s'aligne sur une même droite d'évaporation de pente égale à 4,5, pente caractéristique de l'évaporation d'un plan d'eau (Fontes, 1976). Le point d'intersection avec la droite météorique régionale, droite calculée à partir des teneurs isotopiques des pluies de la saison 1991 sur deux stations, donne la composition isotopique du stock d'eau initial avant sa reprise par évaporation, ce qui correspond au mélange des dernières pluies de la saison.

La modélisation de l'évolution de la composition isotopique lors de l'évaporation d'un bassin peut être décrit par une équation de distillation de Raleigh (3) dans le cas

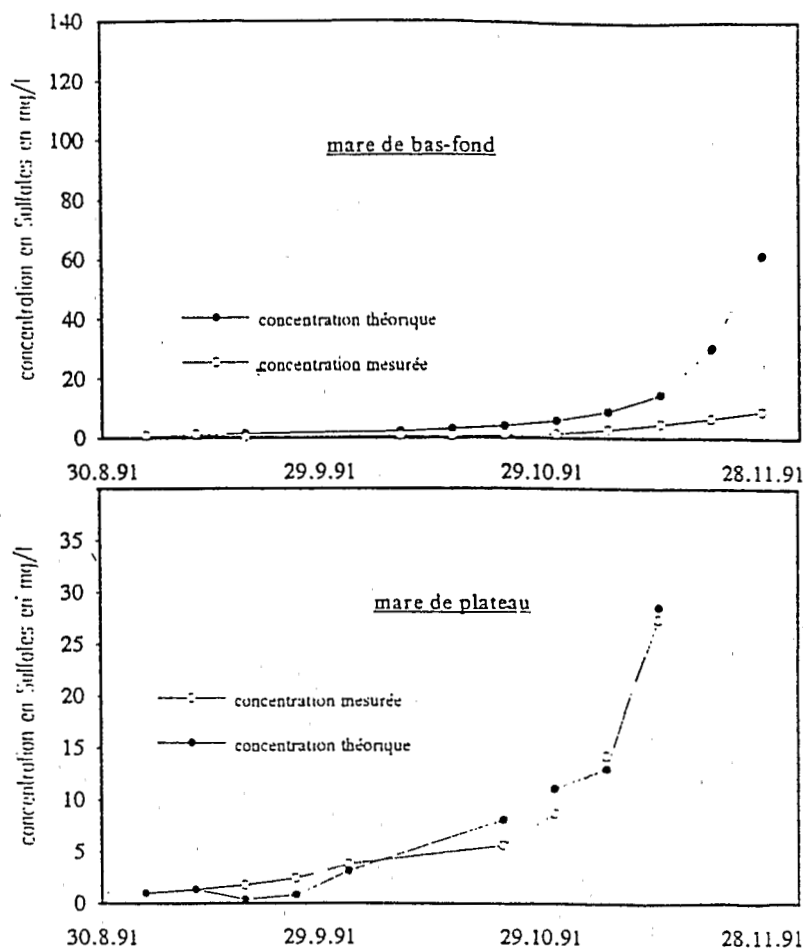


Fig. 8 Evolution des Sulfates sur les deux types de mare lors de la phase d'assèchement.

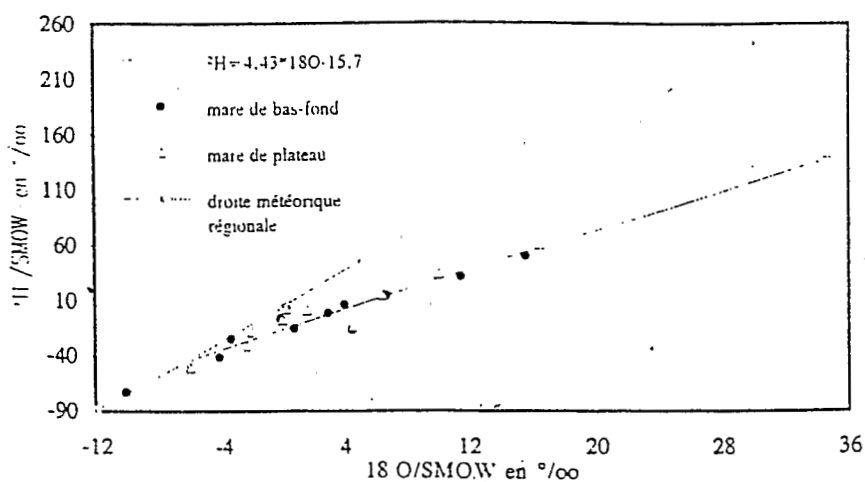


Fig. 9 Evolution des teneurs isotopiques de l'eau des mares lors de l'assèchement: diagramme 18O et 2H.

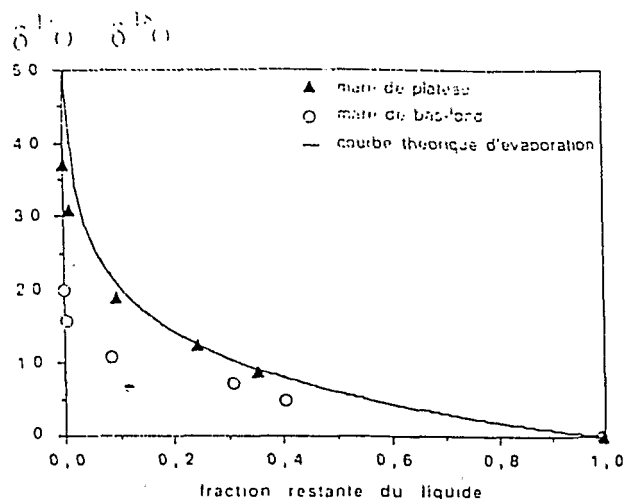


Fig. 10 Evolution des teneurs isotopiques sur les deux types de mare lors de l'assèchement (Modèle de distillation de Raleigh).

où l'on considère qu'il n'y a pas d'échange avec l'atmosphère:

$$\delta_L - \delta_{L_0} = -\xi_v \ln f \quad (3)$$

avec δ_L égal à la teneur isotopique au temps t et δ_{L_0} égal à la teneur en isotopes au temps zéro, ξ_v égal à l'enrichissement isotopique à l'équilibre et f à la fraction restante du liquide.

D'après la figure 10, on constate que la mare de plateau montre un enrichissement de la composition isotopique qui correspond à la courbe théorique de perte par évaporation tandis que la mare de bas-fond montre des valeurs plus basses indiquant en plus de l'évaporation une perte par infiltration. Par comparaison des fractions restantes théoriques et observées à chaque pas de temps on peut estimer entre 10 et 20% la perte de volume.

PERSPECTIVES-CONCLUSION

L'examen détaillé du régime des mares de plateau et de bas-fond, a mis en évidence l'existence d'un processus de vidange rapide qui est consécutif à chaque crue et qui est lié au dépassement d'une couche de sédiments imperméabilisants du lit de la mare. En terme de bilan, il joue un rôle primordial dans la redistribution de l'eau vers la zone non saturée, en particulier dans le bilan des mares de bas-fond car l'on constate que plus de 90% des volumes qui transitent par la mare sont perdus par infiltration durant la saison des pluies. En ce qui concerne le déstockage d'inter-saison, l'utilisation des méthodes chimique et isotopique pour déterminer les part infiltrée et évaporée confirment le déstockage par évaporation essentiellement pour la mare de plateau et l'existence de pertes par infiltration pour la mare de bas-fond. Afin de connaître effectivement la réelle destination de l'eau qui transite par la mare vers la zone non saturée, il sera nécessaire de mettre en place une instrumentation pouvant rendre compte de l'existence d'une connexion entre les mares et les nappes profondes.

Un nouveau dispositif expérimental sera installé pour l'hivernage 1992 visant à multiplier les sites échantillons. Il nous permettra d'étendre le bilan hydrologique à un plus grand nombre de mares et ainsi de valider nos constatations quant à l'importance du déstockage rapide. La mise en place d'une surveillance aérienne du secteur d'étude devrait nous permettre d'appréhender les variations de stocks et permettre ainsi l'extension du bilan hydrologique à l'échelle régionale.

REFERENCES

- Desconnets, J.C., Taupin, J.D., Esteves, M., Gréard, M., Gualde, R., Kong, J., Lebel, T. (1992) *Etude des systèmes endoréiques en milieu sahélien. Rapport de campagne et premiers résultats.* ORSTOM-HAPEX-Sahel. Niamey.
- Fontes, J.C.H. (1976) *Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles: quelques aspects.* Thèse de Doctorat d'état des sciences naturelles, Université de Paris 6.
- Pouyaud, B. (1985) *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 des sciences naturelles. Université Paris-sud.
- Plummer, L.N., Jones, B.F. and Truesdel, A.H. (1976) *WATEQF, a fortran 4 version of Wateq, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters.* U.S. Geol. Survey Water Res. Invest. 76-13.