

# Évolutions paradoxales des mares en Sahel non cultivé

## Diagnostic, causes et conséquences

*Laurent KERGOAT, Manuela GRIPPA, Pierre HIERNAUX,  
Johanna RAMAROHETRA, Julie GARDELLE, Cécile DARDEL,  
Fabrice GANGNERON, Laetitia GAL, Luc DESCROIX*

## Introduction

Une conséquence inattendue de la sécheresse multi-décennale qui affecte le Sahel depuis les années 1970 a été l'augmentation des écoulements d'eau en surface, conduisant à différents phénomènes rassemblés sous le terme de « paradoxe sahélien ». Ce paradoxe, qui peut se résumer par la formule lapidaire « moins de pluies, mais plus d'eau dans les rivières », est décrit par Descroix *et al.* (chap. 7, ce volume). La plupart des observations de ce paradoxe ont été effectuées en milieu sahélien cultivé, et le phénomène a coïncidé avec d'importants changements d'occupation du sol, se traduisant par une mise en culture progressive des terres et un développement des jachères courtes par rapport aux jachères longues. En conséquence, l'augmentation du ruissellement a été souvent attribuée à ces changements d'usage des sols. Dans le même temps, les travaux de terrain ont montré que le ruissellement sur les champs cultivés était intrinsèquement moins important que sur les jachères ou savanes, ce qui n'est pas cohérent avec une augmentation du ruissellement causée par la mise en culture. Plusieurs auteurs ont donc attribué à un encroûtement superficiel des sols la responsabilité de l'accroissement du ruissellement. Dans ce contexte, l'étude des écoulements en Sahel pastoral, qui fait l'objet de ce chapitre, éclaire d'un jour nouveau à la fois l'extension spatiale du paradoxe sahélien, mais aussi et surtout les mécanismes à l'œuvre dans ces changements d'hydrologie, ainsi que les conséquences qu'ils peuvent avoir sur les systèmes de production et l'occupation des territoires en milieu sylvopastoral.

## « Les pluies baissent, les mares montent » : les mares du Gourma (1950 à 2010)

La première extension du domaine touché par le paradoxe sahélien au Sahel pastoral, non cultivé donc, a été présentée par GARDELLE *et al.* (2010), pour la région du Gourma malien. En se basant sur une utilisation systématique des images de satellites d'observation de la terre, des images des satellites-espions déclassés et des photographies aériennes (voir fig. 1), GARDELLE *et al.* (2010) ont mis en évidence une augmentation spectaculaire des surfaces des mares depuis les années 1950, avec une accélération du phénomène dans les années 1990. L'objectif initial était de savoir dans quelle mesure les observations personnelles sur le terrain de Pierre Hiernaux, de 1984-2008, qui faisaient état d'une augmentation des surfaces en eau et d'une transition mare temporaire/mare pérenne pour la mare d'Agoufou, étaient quantifiables et généralisables sur le Gourma. De plus, il était particulièrement intéressant de savoir à quel moment ces changements étaient intervenus. Nous rappelons ici les méthodes et résultats principaux de cette étude.

Le Gourma malien est littéralement la rive droite du fleuve Niger, où celui-ci forme une boucle et atteint ses latitudes les plus hautes. Le Gourma est largement endoréique, c'est-à-dire que l'eau ruisselée pendant la mousson n'atteint pas le fleuve,

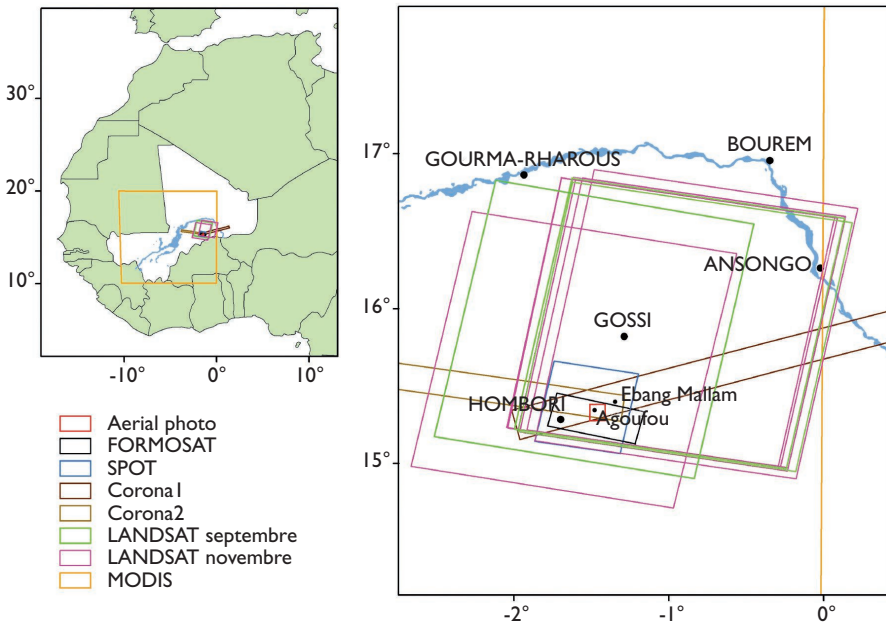


Figure 1.

Site d'étude et trace au sol des différentes images utilisées par GARDELLE *et al.* (2010) sur le Gourma.



Figure 2.

Exemple de mares du Gourma.

Mare de Dimamou, en haut, eau peu turbide partiellement recouverte de plantes aquatiques.

Mare de Zalam-Zalam, en bas, eau turbide

et arbres récemment asphyxiés par une inondation de plus en plus marquée.

mais se concentre pour former des mares ou des lacs. Deux types de mares se distinguent par des signatures spectrales différentes : les eaux turbides et les eaux non turbides plus ou moins couvertes par de la végétation aquatique.

Deux cas représentatifs de la situation du Gourma malien illustrent bien l'ensemble de l'étude de GARDELLE *et al.* (2010) : l'évolution des mares d'Agoufou et d'Ebang Mallam, près de Hombori.

### L'exemple des mares d'Agoufou et d'Ebang Mallam

Sur ces deux mares, l'évolution est spectaculaire. Les images de la figure 3 sont à la même échelle. Pour Agoufou, le petit bas-fond boisé de 1966 est devenu une mare, ou même un lac, de 300 ha en saison des pluies. Les arbres, du genre *Anogessius*, présents en 1966 dans le petit bas-fond, ont été asphyxiés par la montée des eaux et sont toujours présents sous forme d'arbres morts au milieu de la mare.

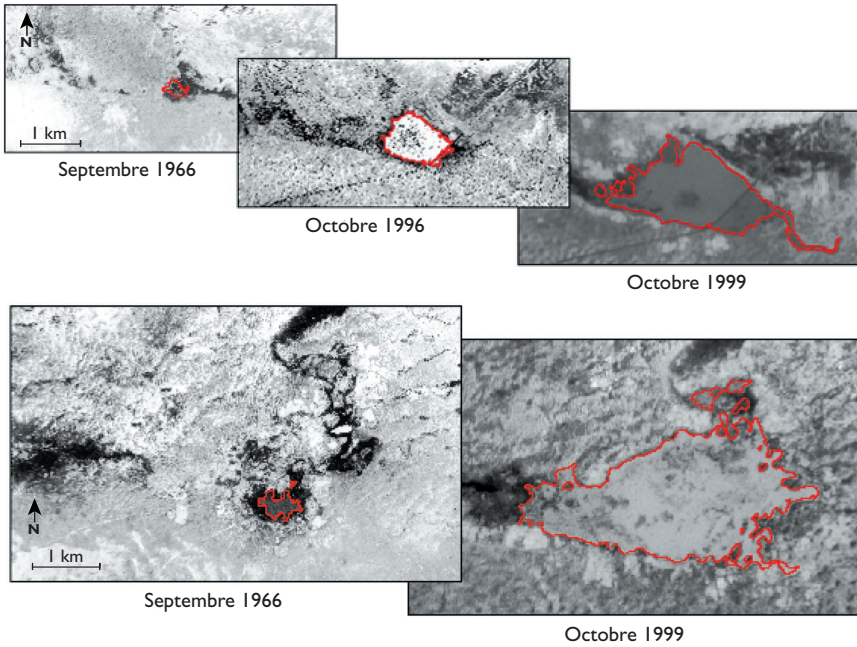


Figure 3.  
 En haut, évolution de la surface de la mare d'Agoufou au cours du temps :  
 1966, en décennie humide, puis 1996, en décennie sèche,  
 et 1999, année pluvieuse des décennies sèches.  
 En bas, évolution de la mare d'Ebang Mallam.  
 Les contours des mares sont délimités en rouge.  
 Source : extrait de GARDELLE et al. (2010).

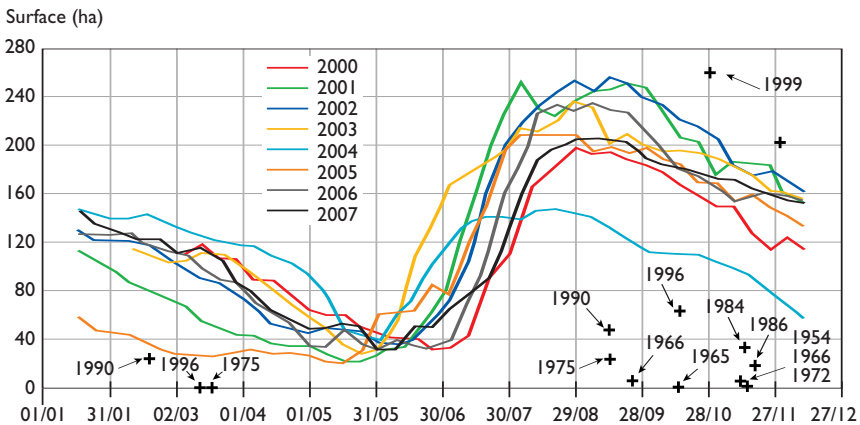


Figure 4.  
 La surface de la mare d'Agoufou pour différentes dates, reportées sur un cycle annuel.  
 On distingue clairement le cycle saisonnier actuel sur les données Modis  
 (en couleur, de 2000 à 2007), ainsi que toutes les valeurs très faibles d'août-novembre  
 antérieures à 1984, qui augmentent légèrement en 1990 et 1996,  
 puis atteignent de très fortes valeurs en 1999 et 2000-2007.

Peut-être plus importante encore que l'augmentation de la surface de la mare, l'augmentation du ruissellement a entraîné la conversion de la mare temporaire en mare permanente. Sur la figure 4, on peut voir le cycle saisonnier complet de la mare d'Agoufou pour les années 2000 à 2007. Même après les années les plus sèches, comme 2004, il reste de l'eau dans la mare pendant toute la saison sèche, ce qui n'était pas le cas avant les années 1990. Il y a donc un point d'eau nouveau, ce qui a des conséquences importantes pour le bétail, les populations.

### Sur l'ensemble du Gourma

Le même phénomène a été mis en évidence par l'étude systématique de toutes les mares et lacs du Gourma central, délimité par l'intersection des données Landsat sur la figure 1, qui couvre une zone d'environ 180 km sur 100 km. La surface moyenne des mares a fortement augmenté (fig. 5).

Cette évolution spectaculaire est donc un phénomène général. Il y a cependant une variabilité dans le comportement des mares. Elle provient des caractéristiques des bassins versants, qui peuvent changer au cours du temps, notamment par des captures d'une mare par une autre, en particulier lorsque les mares sont organisées en chapelet. On peut distinguer néanmoins trois zones géographiques, étagées du Nord- au Sud-Gourma. L'augmentation des surfaces est plus prononcée pour les eaux turbides du nord et du centre du Gourma, ce qui correspond aux latitudes de 15,5° à 17° Nord, c'est-à-dire à des précipitations de 350 à 150 mm par an sur les décennies récentes. Cette zonation pourrait suggérer une plus grande sensibilité des systèmes hydrologiques dans cette gamme de précipitations.

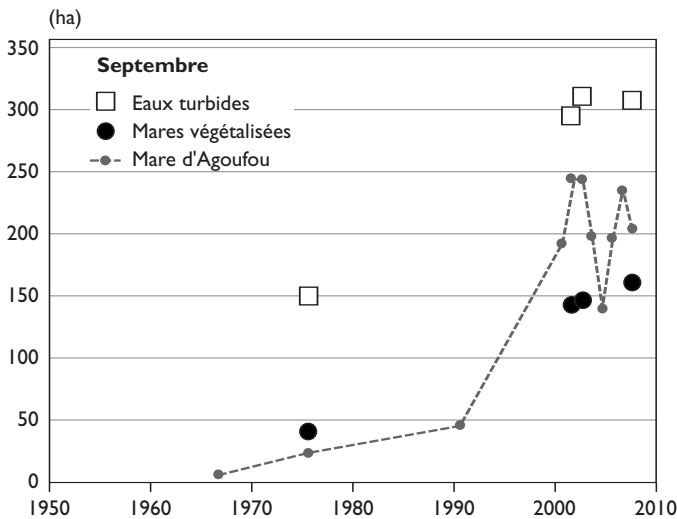


Figure 5.

Évolution de la surface moyenne des 91 mares du Gourma central en septembre.

Source : extrait de GARDELLE et al. (2010)

Cette première étude a donc montré de manière spectaculaire que les eaux de surface ont très fortement augmenté dans le Gourma au cours des cinquante dernières années. Cette dynamique, amorcée dès 1984, prend toute son ampleur dans les années 1990. Le fait frappant, bien sûr, est que cette évolution n'est pas corrélée au cumul annuel de précipitations, illustré pour la station de Hombori sur la figure 6.

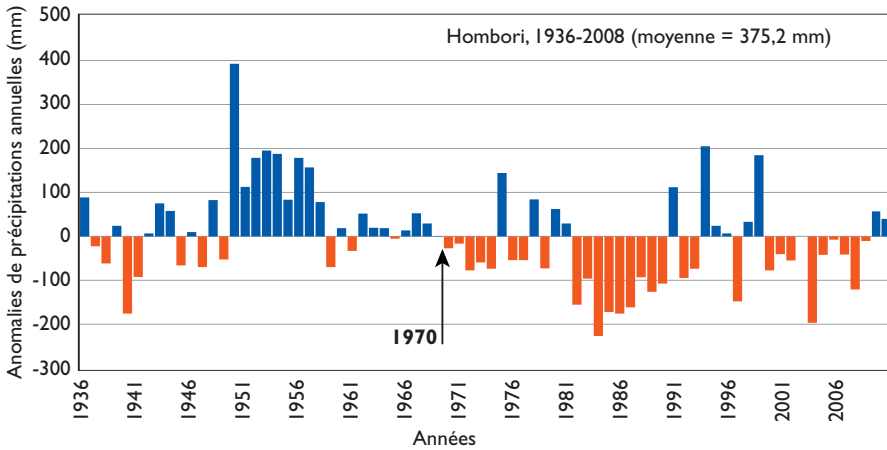


Figure 6. Anomalies de précipitations annuelles à Hombori (1936-2008), complétée jusqu'en 2011 (données DNM, Mali).

Si l'on trace le volume d'eau alimentant la mare d'Agoufou divisé par le volume des précipitations tombant sur l'ensemble du bassin versant, ce qui donne le coefficient de ruissellement du bassin, on obtient donc une augmentation spectaculaire (fig. 7).

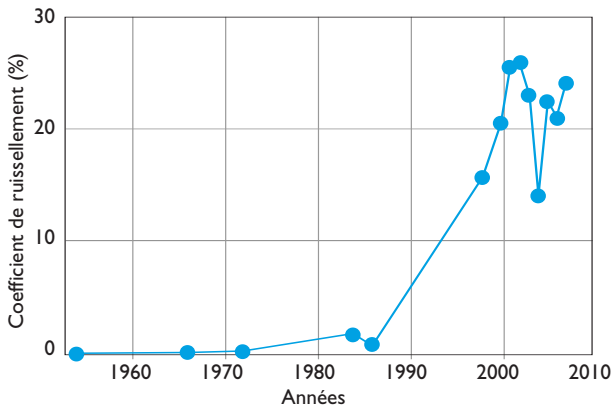


Figure 7. Coefficient de ruissellement sur le bassin de la mare d'Agoufou. Source : DARDEL et al. (2014).

Sur l'ensemble du Gourma, les surfaces en eau ont augmenté à la suite des grandes sécheresses des années 1970-1980, puis ont continué à augmenter pendant deux décennies suivantes, globalement déficitaires (1990-2008). GARDELLE *et al.* (2010) ont passé en revue les facteurs susceptibles d'entraîner un tel phénomène. Ils ont d'abord écarté différentes causes potentielles, comme les ouvrages d'art, le colmatage des mares, le changement d'occupation du sol. Leur analyse a montré que le changement d'usage des sols, classiquement invoqué pour expliquer l'augmentation du ruissellement de surface en Sahel pastoral, n'est pas non plus déterminant.

### Peut-on exclure une intensification des précipitations ?

Ce phénomène d'intensification, observé sous d'autres latitudes et attendu dans le cadre d'un changement climatique, a été pointé par FRAPPART *et al.* (2009), pour le Gourma, et démontré par PANTHOU *et al.* (2014), pour le Sud-Ouest-Niger, sur la base de données de précipitations journalières. On pourrait en effet s'attendre à ce que de plus fortes intensités produisent plus de ruissellement de surface, pour un même cumul. Il est difficile d'exclure ce facteur, mais la tendance détectée par FRAPPART *et al.* (2009) et PANTHOU *et al.* (2014) concerne essentiellement la décennie 2000-2010. Or, nous avons vu que l'augmentation de surface des mares commence bien avant, dès 1984 en fait, et se produit surtout dans les années 1990, pour lesquelles le signal d'intensification n'est pas détecté.

L'hypothèse la plus probable, retenue dans le cadre du Sahel non cultivé du Gourma, est celle d'un effet retard des sécheresses extrêmes au travers de changements écohydrologiques, c'est-à-dire du système couplant le couvert végétal et le cycle de l'eau.

## Le bassin de Tin Adjar (Mali)

La documentation des phénomènes pluridécennaux des périodes passées, typiquement ici depuis les années 1950, est rare et parcellaire. Toutefois, Dubreuil et ses collaborateurs de l'Orstom ont étudié à cette époque un petit bassin versant du Gourma (DUBREUIL, 1972). Il s'agit du bassin de Tin Adjar, situé dans la partie nord du Gourma.

Nous avons revisité ce site, à la fois sur le terrain au cours de plusieurs missions et aussi sur différents documents de télédétection, afin de voir quels changements avaient affecté le bassin durant la période allant de 1950 (période humide) à nos jours (périodes sèches ou fin de période sèche).

Le bassin de Tin Adjar couvre environ 29 km<sup>2</sup> et s'étend entre les latitudes 16,28 et 16,33 N, à la longitude de - 1,65 W. Il s'incline d'est en ouest, mais il est presque fermé par une barre de quartzite à l'ouest, laissant l'oued s'écouler par un seuil bien défini, et par des dunes fixées au nord et au sud. Le cumul annuel des précipitations varie entre 200 et 120 mm, suivant que l'on considère les décennies sèches ou pluvieuses.



La cartographie du réseau hydrologique, établie à partir d'images aériennes et d'images satellitaires à haute résolution (KERGOAT *et al.* en prép.), montre une évolution spectaculaire entre 1954 et 2007 (fig. 8).

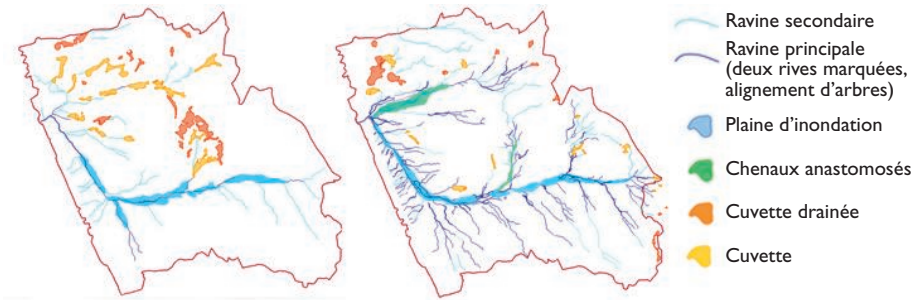


Figure 8.  
Évolution du réseau hydrique du bassin de Tin Adjar entre 1954, à gauche,  
et 2007, à droite.

Source : KERGOAT *et al.* (en prép.).

La multiplication des ravines, le développement d'un réseau d'ordre supérieur, le drainage de la plupart des cuvettes de mi-pente et l'extension des plaines d'inondation sont les changements les plus marquants. Ils traduisent tous une importance accrue du ruissellement, alors même que le cumul de pluie était bien plus important en 1954 et sur toute la décennie 1950-1960, que sur 2007 et l'ensemble des décennies récentes.

Les statistiques calculées pour l'ensemble du bassin, à la fois pour les surfaces et pour les transitions entre ces types de surfaces entre 1954 et 2007, traduisent les changements principaux intervenus entre ces deux dates (tabl. 1).

Les changements les plus marquants, reportés dans le tableau 1, sont l'augmentation des « affleurements rocheux et cuirasses », qui occupent 12 % du bassin en plus en 2007 par rapport à 1954, la diminution des « surfaces sableuses », et la diminution

Tableau 1.  
Surface relative (en %) des différents types de surface sur Tin Adjar (Mali)  
en 1954 et 2007.

Type de surface	1954	2007
Sables	40,4	29,4
Affleurements rocheux	31,9	43,2
Limons décapés	13,3	20,0
Sols argilo-limoneux de bas-fonds	10,8	5,4
Couvert arboré	3,7	2,0



générale de l'ensemble « sols argilo-limoneux de bas-fonds et couverts arborés ». Les limons décapés augmentent également significativement. Ces chiffres, dans leur ensemble, indiquent une érosion forte sur bassin versant.

Les transitions sont également informatives (tabl. 2).

Tableau 2.  
Matrice de transition entre les classifications de 1954 et 2007.  
En gras, chiffres particulièrement frappants.

	Sable en 2007	Affleurement	Limon décapé	Argilo-limon	Arbres
Sable en 1954	17,1	<b>12,4</b>	7,9	1,9	1,0
Affleurement	4,9	21,2	3,6	1,7	0,4
Limon décapé	4,2	2,9	5,3	0,5	0,3
Argilo-limon	2,3	<b>5,0</b>	<b>2,3</b>	0,9	0,2
Arbres	0,8	1,6	0,8	0,4	0,1

Le premier chiffre intéressant est celui des « surfaces sableuses » de 1954 qui sont devenues des « affleurements » en 2007. Ce chiffre traduit une érosion importante sur les pentes, même douces, de ce bassin versant. On note que d'autres classes contribuent légèrement à l'augmentation des affleurements. Un examen des cartes et du tableau 2 montre aussi que le bas du bassin, près de l'exutoire, s'est à la fois érodé et ensablé. Le deuxième point notable de ce tableau est la quasi-disparition des bas-fonds aux sols argilo-limoneux, qui ont laissé la place à des affleurements, du limon décapé, ou du sable.

La figure suivante (fig. 9) montre deux extraits d'une petite partie du bassin versant, proche de l'exutoire. Sur l'image de 2007, on distingue deux zones d'affleurement rocheux (en brun et noir) dont la plus grande n'existe pas en 1954. À l'inverse, les bas-fonds boisés qui sont nombreux en 1954 (zones sombres mouchetées d'arbres)

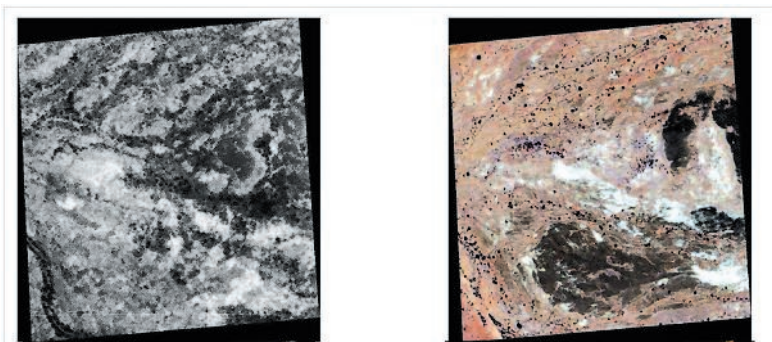


Figure 9.

Imagette extraite du bassin de Tin Adjar, juste en amont de l'exutoire.  
À gauche, la photographie aérienne de 1954 ; à droite, l'image Quickbird de 2007.

ont disparu en 2007 et sont remplacés par des zones de limon décapé, du sol nu donc. Cette sous-couche de limon, peut-être un lœss péri-désertique, est typique des sols du Gourma (DE GIRONCOURT, 1912). On peut voir également sur la partie nord de l'imagerie un développement du réseau hydrographique peu développé en 1954. Cette partie du bassin a été considérablement érodée puis alluvionnée, le sable y apparaît en rose clair sur l'image de 2007.

L'évolution des types de surface et les transitions entre ces types indiquent donc une forte érosion sur l'ensemble du bassin et une modification importante des écosystèmes. En effet, les surfaces sableuses sont propices à la croissance des herbacées annuelles, accompagnées de quelques arbres épars, les bas-fonds argilo-limoneux abritent, ou abritaient, la plupart des arbres du bassin, ainsi qu'un couvert herbacé dense, alors que les surfaces de limon décapé et les affleurements ne permettent aucune installation de la végétation sous ces régimes de pluies. La concentration du ruissellement dans un réseau de ravines marquées est également un facteur défavorable au maintien d'un couvert végétal important sur des surfaces étendues qui ne reçoivent plus, de ce fait, le ruissellement en nappe qui prévalait généralement. Tous ces indicateurs suggèrent fortement que l'augmentation du ruissellement implique la régression des couverts végétalisés, la concentration du ruissellement et l'érosion qui créent des affleurements rocheux ou des zones de limons décapés peu propices à la croissance végétale.

## Un phénomène régional ?

En parallèle au travail sur Tin Adjar, et pour régionaliser l'étude du phénomène « mares sahéliennes », nous avons mené un travail sur la zone du Hodh mauritanien et une zone du Niger pastoral (fig. 10).

Suivant une méthodologie comparable à celle mise au point par GARDELLE *et al.* (2010), Calas et collaborateurs (CALAS, 2012) ont également pu mettre en évidence une augmentation de la surface des mares du Hodh mauritanien (fig. 11).

Les précipitations de 1972 sont les plus élevées, sur le Hohd (fig. 11), ce qui suggère également un changement du coefficient de ruissellement, du régime hydrique et de l'écohydrologie de la région. De manière plus préliminaire, des changements de surface des mares ont également été détectés dans la région de Zinder au Niger.

On voit donc que ce phénomène d'augmentation des surfaces des mares sahéliennes est répandu de la Mauritanie au Niger, dans des régions qui possèdent des caractéristiques communes : 1) les mares sont essentiellement alimentées par le ruissellement sur des sols peu profonds, qui ne couvrent pas forcément une surface relative très importante, mais sur lesquels le ruissellement est très fort ; 2) l'utilisation agricole des terres est très restreinte et localisée.

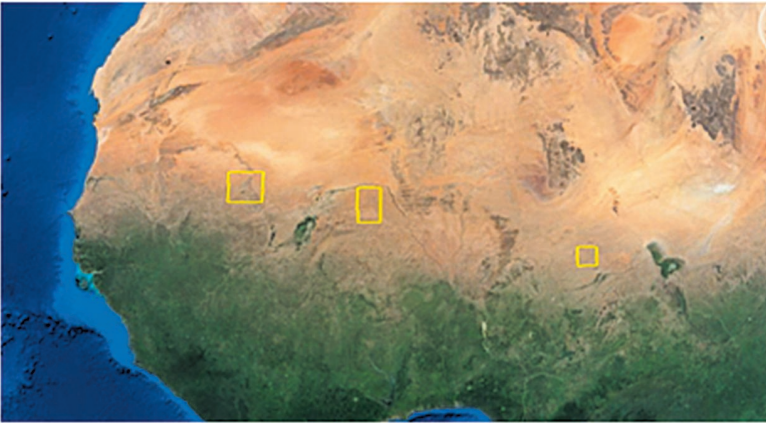


Figure 10.  
Zones d'études des mares sahéniennes, d'ouest en est :  
Hodh mauritanien, Gourma malien, région de Zinder.

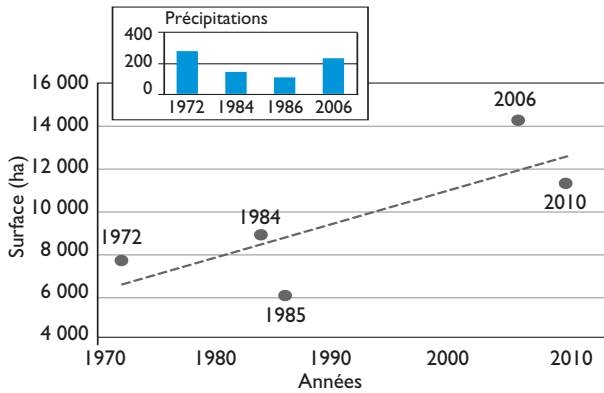


Figure 11.  
Évolution de la surface des mares du Hodh mauritanien  
à partir d'une série Landsat de novembre.  
Source : CALAS (2012).

## Les mécanismes pressentis

### L'écohydrologie en marche

Nous avons vu que sur plusieurs sites du Sahel pastoral, non cultivé donc, en Mauritanie, au Mali et Niger, les mares ont connu une augmentation de surface, parfois spectaculaire, alors même que les précipitations ont connu une évolution inverse. Se pose évidemment la question des mécanismes à l'œuvre, qui conduisent à cette évolution d'apparence paradoxale.

Nous avons montré que le paradoxe sahélien opère en zone non cultivée, ce qui entraîne qu'il existe au moins un mécanisme non lié à la mise en culture. Comme la possible augmentation de l'intensité des précipitations est écartée, l'hypothèse la plus vraisemblable est liée à un changement du ruissellement causé par un changement de l'écohydrologie sur sols peu profonds. Nous avons vu, par exemple sur Tin Adjar, mais cela se voit également sur d'autres zones du Gourma et du Sud-Ouest-Niger, que deux changements se manifestent en parallèle : 1) régression de la végétation, visible sur les ligneux, mais aussi sur le couvert herbacé ; 2) développement de ruissellement concentré. À ceux-ci s'ajoute parfois une érosion importante.

Nous proposons donc le mécanisme suivant : au cours d'une sécheresse extrême, la végétation herbacée, largement composée d'annuelles, ne se développe pas. Le ruissellement, pendant la saison des pluies, est accéléré. Normalement, ce ruissellement est plus important en début de saison des pluies, avant la croissance des herbacées (DUBREUIL, 1972). En cas de sécheresse, on peut penser qu'il reste important pendant toute la saison, même si le nombre d'orages diminue en année sèche. Ce ruissellement prolongé et accéléré commence à emprunter des chemins préférentiels, alors qu'il est normalement « en nappe » sur ces sols peu profonds aux pentes peu marquées. Cette concentration de l'eau diminue la reprise du ruissellement de surface par la végétation : de petites ravines contournent les ensablements sur lesquels poussent les herbacées. La saison suivante, ces chemins préférentiels sont de nouveau empruntés, privant de nouveau la végétation d'une partie de son alimentation hydrique et ainsi de suite. Il y a une rétraction positive, qui peut amener de plus une érosion hydrique importante sur les sites les plus touchés comme Tin Adjar.

Dès lors que l'on avance l'hypothèse d'une dégradation des couverts végétaux sahéliens, il faut s'interroger sur la compatibilité de ce phénomène avec le reverdissement général observé depuis l'espace, mais aussi au sol, et largement détaillé au chapitre Dardel *et al.* de ce livre.

### Dégradation et reverdissement sont-ils compatibles ?

L'augmentation du coefficient de ruissellement est citée comme un indicateur de la désertification. Ce chapitre et celui de Descroix *et al.* suggèrent donc que la désertification, vue sous cet angle, serait généralisée au Sahel. La productivité végétale est également citée comme un indicateur de désertification, quand elle présente une baisse marquée, par exemple due à une réduction de sa capacité à utiliser les précipitations. À partir d'observations de terrain et de diagnostics satellitaires de la productivité herbacée, DARDEL *et al.* (2014) ont pu montrer que l'efficacité à utiliser les précipitations (en anglais le *Rain Use Efficiency*, ou RUE, parfois caractérisé par les résidus de la corrélation production/précipitations, comme sur la figure 12) n'avait pas changé sur le Gourma sur la période 1984-2010. Sur cette période, qui débute au maximum de la sécheresse, précipitations et productivité augmentent parallèlement. Néanmoins, quand on s'intéresse exclusivement aux sols peu profonds, minoritaires dans cette région, on observe une diminution du RUE et des résidus de la relation linéaire production/précipitations.

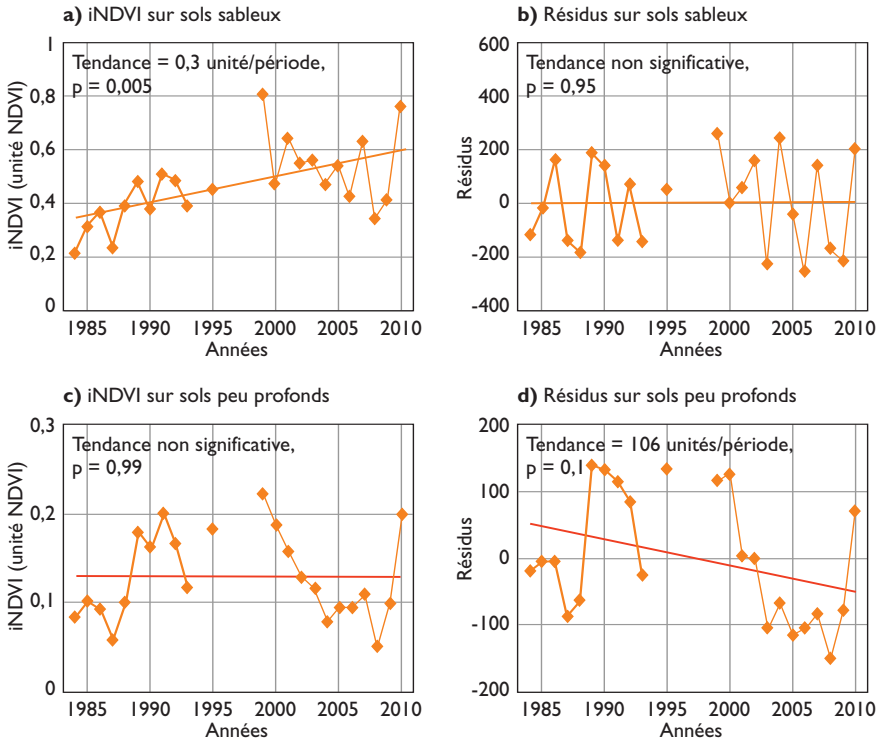


Figure 12.

Évolution de l'indice de végétation sur les sols sableux (a) et peu profonds (c) durant la période 1984-2010.

À droite (d) figure la part du signal qui n'est pas expliquée par les précipitations (résidu de la corrélation NDVI/précipitations).

Un signal stable au cours du temps (b) montre que les écosystèmes sur sols sableux sont résilients, alors qu'une dégradation est observable sur les sols peu profonds (d).

Source : DARDEL et al. (2014).

Reverdissement général et dégradation sur des petites surfaces pourraient donc se produire sur la même période, le second phénomène, par son emprise localisée, étant masqué par la résilience générale des écosystèmes, largement dominante en termes de surface.

## Conséquences de ce changement environnemental

L'évolution des points d'eau qui a suivi les sécheresses les plus fortes des années 1970-1980 a très souvent des incidences sur plusieurs aspects du fonctionnement

des systèmes de production, et plus largement sur les sociétés rurales et les écosystèmes sahéliens. Dans le Gourma, par exemple, du fait des caractéristiques géologiques, les eaux souterraines sont peu présentes, peu exploitables et peu exploitées. Les eaux de surface, à l'inverse, sont très présentes en saison des pluies, elles diminuent fortement en saison sèche pour ne laisser en mars-avril-mai que quelques mares permanentes. Très schématiquement, les points d'eau permanents, les mares, les puisards, les puits dans les nappes superficielles ou les rares puits profonds permettent l'installation de villages, alors que les mares temporaires permettent une occupation temporaire du territoire, en particulier liée à l'élevage pastoral. Le cas de la mare d'Agoufou est une bonne illustration du développement à la fois d'un village, mais aussi d'une zone de résidence importante du bétail en saison sèche. Les néo-mares permanentes constituent des opportunités d'ancrage de populations constamment soumises à la rareté des ressources en eau. Dans de vastes zones du Gourma, à cette saison, seuls les voisinages des points d'eau permanents sont occupés dans la durée. On voit ici que mesurer l'impact des changements écohydrologiques observés n'est pas une chose simple, que viennent rapidement se greffer des questions d'occupation du territoire, d'usages, d'accès à la ressource.

## Conclusions

Le phénomène d'augmentation des eaux de surfaces, lié à la réponse écohydrologique des sols peu profonds aux sécheresses extrêmes (1973, 1984), peut être vu comme une « dégradation », au sens d'une baisse de la productivité végétale difficilement réversible à court terme. Néanmoins, la concentration de l'eau de pluie dans les mares prolonge la disponibilité de l'eau en saison sèche, ce qui a des impacts importants et souvent largement positifs sur plusieurs domaines d'activité, et des conséquences écologiques également, en particulier pour la faune : par exemple, les emblématiques éléphants qui passent la saison sèche dans le Gourma et ponctuent leur séjour de visites aux mares permanentes.

Il est naturel de se poser la question de l'inscription de ce phénomène dans la durée. Pour inverser la concentration et l'augmentation du ruissellement de surface, il faudrait, soit un comblement des ravines, ce qui est physiquement difficile à concevoir, soit des précipitations assez importantes et régulières pour que la végétation puisse pousser sur les ensablements ou les barres limoneuses privées de l'apport du ruissellement en nappe, afin d'enrayer l'accélération du ruissellement concentré. De plus, sur les sites érodés comme Tin Adjar, un ré-ensablement préalable des affleurements rocheux par apport éolien serait nécessaire. Il est difficile de savoir si de telles conditions pourront être remplies dans les décennies à venir. On peut raisonnablement penser que la concentration du ruissellement et le remplissage des mares vont perdurer, indépendamment du niveau des précipitations, pendant

les prochaines décennies. Ce qui est certain, cependant, est qu'il est impératif de disposer de modèles représentant ce paradoxe sahélien, dès lors que les ressources en eau de surface sont concernées, sous peine d'obtenir des simulations erronées des ressources en eau dans ces zones.

## Références

**CALAS A., 2012**

*Suivi des mares du Hodh (Mauritanie) par télédétection spatiale.*  
Mémoire de master 1,  
université de Toulouse.

**DARDEL C., KERGOAT L.,  
HIERNAUX P., GRIPPA M.,  
MOUGIN E., CIAIS P.,  
N'GUYEN CAM-CHI, 2014**

Rain-Use-Efficiency:  
What it Tells us about the Conflicting Sahel  
Greening and Sahelian Paradox.  
*Remote Sensing*, 6 : 3446-3474.  
doi:10.3390/rs6043446

**DE GIRONCOURT, 1912**

Le sommet de la boucle du Niger.  
Géographie physique et botanique.  
*La Géographie*, XXV (3).

**DUBREUIL P., 1972**

*Recueil des données de bases des bassins  
représentatifs et expérimentaux,  
années 1951-1969.*  
Paris, Office de la recherche scientifique  
et technique outre-mer, 916 p.

**FRAPPART F., HIERNAUX P.,  
GUICHARD F., MOUGIN E., KERGOAT L.,  
ARJOUNIN M., LAVENU F., KOITÉ M.,  
PATUREL J.-E., LEBEL T., 2009**

Rainfall regime across the Sahel band  
in the Gourma region, Mali.  
*J. Hydrol.*, 375 (1-2) : 128-142.

**GARDELLE J., HIERNAUX P.,  
KERGOAT L., GRIPPA M., 2010**

Less rain, more water in ponds:  
a remote sensing study of the dynamics  
of surface waters from 1950 to present  
in pastoral Sahel (Gourma region, Mali).  
*Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14 : 309-324.

**KERGOAT L., RAMAROHETRA J.,  
HIERNAUX P., in preparation**

The Sahelian paradox in a non-cultivated  
Sahelian watershed: revisiting the Tin-Adjar  
catchment (Mali), 1954-2007.  
*J. Arid Envir.*

**PANTHOU G., VISCHEL T. LEBEL T., 2014**

Recent trends in the regime  
of extreme rainfall in the Central Sahel.  
*Int. J. Climatol.*, 34 (15) : 3998-4006.  
doi: 10.1002/joc.3984



Kergoat L., Grippa M., Hiernaux P., Ramarohetra Johanna, Gardelle J., Dardel C., Gangneron F., Gal L., Descroix Luc.

Evolutions paradoxales des mares en Sahel non cultivé : diagnostic, causes et conséquences.

In : Sultan Benjamin (ed.), Lalou Richard (ed.), Amadou Sanni M. (ed.), Oumarou A. (ed.), Soumaré M.A. (ed.). Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest.

Marseille : IRD, 2015, p. 193-207. (Synthèses). ISBN 978-2-7099-2146-6