

La saison des pluies 1991 en Afrique de l'ouest soudano-sahélienne. Suivi à partir d'images Météosat

par J.-P. LAHUEC *, M. CARN *, O. LEMOIGNE **, D. DAGORNE *

* Antenne ORSTOM, CMS Lannion, B.P. 147, 22302 LANNION

** CMS Lannion, B.P. 147, 22302 LANNION

RÉSUMÉ

Le suivi qualificatif de l'hivernage 1991 en Afrique de l'ouest soudano-sahélienne est effectué à partir de catalogues d'images (dix-huit décades consécutives d'avril à septembre). Ces catalogues représentent deux paramètres dérivés de l'imagerie infrarouge Météosat : la fréquence des occurrences de nuages à sommet froid et la température radiative maximum de surface du sol.

L'appréciation de la pluviométrie est réalisée à travers une lecture combinée des deux types d'images et d'une comparaison avec les images moyennes de la période 1986-1990. Il est ainsi possible de déterminer, à l'échelle régionale, quelques paramètres clés du déroulement de la saison des pluies (date de début et de fin, durée des séquences intermédiaires sèches, intensité relative des précipitations...).

Une bonne connaissance des calendriers agricoles est ensuite nécessaire pour autoriser la délimitation des zones dans lesquelles des problèmes vivriers sont à prévoir, victimes d'une arrivée des pluies trop tardive, de précipitations trop irrégulièrement espacées, ou d'une installation trop précoce de la saison sèche.

ABSTRACT

Qualitative monitoring of the 1991 rainy season in Western Sahel countries is based on image-catalogues (eighteen successive ten-day periods). These images display two parameters derived from Météosat infrared imagery : cold top cloud occurrences and soil surface maximum radiative temperature.

A qualitative approach of rainfall is deduced from a combined analyse of both types of images. Additional informations are obtained from comparison with corresponding mean images of the 1986-1990 period. It is then possible to determine, on a regional scale, some key parameters of the ongoing season (beginning, end, duration of intermediate dry periods, relative intensity of precipitations...).

Finally, a good knowledge of agricultural calendars is needed for enabling delineation of critical areas, where food shortages or harvest failures are to be foreseen, due to lack of rains or irregularly spaced precipitations.

Mots clés : Infrarouge Météosat. Convection. Température radiative du sol. Sahel. Pluies. Suivi agricole.

Key words : Météosat infrared. Convection. Soil surface temperature. Sahel. Rainfall. Crop monitoring.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 36.826-101

Cote : B

Au cours de ces deux dernières décennies, les zones semi-arides d'Afrique ont été touchées à de nombreuses reprises par la sécheresse. Les conséquences en ont été parfois dramatiques pour les populations, faute d'obtenir en temps voulu une aide alimentaire efficace.

Dans ces régions, la détection précoce des anomalies climatiques permettant aux instances nationales, régionales ou internationales d'intervenir à bon escient est devenue une nécessité impérieuse. Le problème pourrait être résolu par l'existence d'un réseau d'observations au sol à maille fine couplé à des moyens de transmission en temps réel performants. Malheureusement, tel n'est pas toujours le cas, plus spécialement dans les régions peu peuplées, difficiles d'accès et où le matériel résiste mal à l'épreuve du temps et des conditions climatiques difficiles. De plus, certains pays à risque vivrier sont depuis des années en état de guerre civile permanent, rendant impossible le fonctionnement d'un réseau synoptique d'observations.

Pour compléter les informations des réseaux d'observation ou pour pallier leur absence, il est fait appel aux satellites météorologiques, défilants ou géostationnaires qui, par leur capacité à "voir grand et souvent", offrent d'immenses potentialités de suivi routinier à petite échelle. L'exploitation des données satellitaires a donc débouché, surtout depuis le début des années 1980, sur un foisonnement d'applications. Le suivi de la végétation, le suivi qualitatif, voire quantitatif de la saison des pluies avec, en corollaire, l'application à l'évaluation des récoltes et à la gestion de l'aide alimentaire, le suivi des crues et décrues, la lutte antiacridienne, le suivi des températures de surface de la mer sont des domaines dans lesquels l'apport des données satellitaires peut se révéler primordial.

Les recherches menées à l'antenne ORSTOM s'effectuent dans le cadre d'un programme intitulé *Veille Climatique Satellitaire* (B. Guillot, 1985), dont les résultats sont publiés dans la revue du même nom (5 numéros par an). Elles reposent principalement sur l'utilisation de deux fichiers dérivés de l'imagerie satellitaire infrarouge : la température radiative maximum de surface (océanique et continentale) et le nombre d'occurrences de nuages à sommet froid définis par seuillage thermique à l'échelle du pixel Météosat ($\leq -40^\circ \text{C}$).

Ces fichiers de base sont régulièrement documentés depuis 1986, par période décadaire à l'origine, par période pentadaire depuis 1987. Ils constituent la matière première de diverses applications, tels l'établissement de cartes de température de surface de l'Atlantique tropical, le suivi de l'intensité de la convection et de la migration de la Zone Intertropicale de Convergence en Afrique, le suivi qualitatif du déroulement de la saison des pluies et, par conséquent, de la saison agricole en Afrique de l'ouest, l'estimation des pluies en zone soudano-sahélienne.

Dans cet article, nous présentons l'exemple d'application de la démarche qualitative appliquée à l'hivernage 1991 en Afrique de l'ouest et plus particulièrement en zone soudano-sahélienne. La technique de suivi repose sur

l'appréciation de la pluviométrie à partir de catalogues d'images décennales établies pour chacun des paramètres. Les images de la saison 1991 (*planches 1 et 2*) peuvent être comparées aux images représentant les moyennes interannuelles correspondantes de la période 1986-1990 (*planches 3 et 4*).

Après un bref rappel des principes du traitement, nous proposons au lecteur une interprétation combinée des différents catalogues. Le film de la saison des pluies est reconstitué sans difficulté. Un commentateur, suffisamment averti des pratiques culturelles et des calendriers agricoles de la zone étudiée, peut ainsi juger du déroulement de la campagne en cours, décade après décade et, au bout du compte, évaluer les récoltes.

I. - ELABORATION DES FICHIERS DE BASE

Les données infrarouges Météosat sont acquises au centre de calcul du CMS. Le rythme d'acquisition est de 24 images par jour sur les 48 théoriquement possibles. La procédure mise en place par le Service Informatique du CMS autorise, après calibration de la donnée brute, la réalisation de synthèses journalières et plurijournalières pour les deux types de fichiers requis. Elles sont transférées par réseau Ethernet vers la configuration de traitement qui comporte un mini ordinateur SPS 9, une station de travail et d'archivage SUN avec disque optique numérique, une station de visualisation et de traitement d'images Péricolor, une imprimante couleur Canon HP 310 et une imprimante noir et blanc Laser-Jet Canon.

Le traitement de fichiers relève de l'utilisation d'un ensemble de modules regroupés dans le logiciel TRISKEL mis au point par D. Dagorne.

A) LES CHAMPS D'OCCURRENCES DE NUAGES FROIDS

La pertinence de la relation occurrences de nuages à sommet froid/pluies au sol repose sur le fait que 80 à 90 % des précipitations en zone soudano-sahélienne proviennent de pluies d'orage. Il tombe donc sous le sens qu'un bon repérage des cumulonimbus et une cartographie de leur extension spatiale autorisent en première approximation une bonne appréciation des aires touchées par la pluie. De la même manière, l'intensité des précipitations pendant une période donnée peut être appréciée de manière qualitative en fonction du nombre d'occurrences de nuages froids comptabilisés.

Le succès de la méthode dépend donc de la définition d'un algorithme autorisant une discrimination aussi fiable que possible des nuages d'orage précipitants, et ce, de jour comme de nuit.

Celle-ci est relativement facile le jour, lorsqu'une analyse bi-spectrale visible / infrarouge est possible et autorise l'identification des différents types de nuages. Elle est cependant beaucoup plus ardue la nuit, en l'absence du canal visible. Il a donc été décidé de tester différents seuils de température de brillance dans l'infrarouge sur des images de jour et de retenir celui qui restitue au mieux l'enveloppe des nuages convectifs préalablement reconnus précipitants à l'aide d'une combinaison classique visible / infrarouge. Les différents tests numériques, effectués par les néphanalystes du CMS ont permis de conclure que le seuil de -40°C produisait la meilleure discrimination possible en ce qui concerne la zone soudano-sahélienne. En conséquence, tout nuage dont la température au sommet est inférieure ou égale à -40°C est donc réputé faire partie d'une cellule convective pluvio-gène.

En opérationnel, le traitement informatique " consiste à rechercher dans les images les comptes numériques correspondant à la température de chaque point (pixel), et à comptabiliser les résultats sur un tableau en lignes et points, en attribuant la valeur 1 en cas de présence de nuage à sommet froid (température inférieure ou égale à -40°C) et la valeur 0 dans le cas contraire... " (B. Bellec et al., 1985). Cette matrice est incrémentée image après image à un rythme horaire. Des sommes peuvent ainsi être effectuées à des pas de temps variant de la journée à la saison, créant ainsi des champs d'occurrences de nuages à sommets froids.

La technique utilisée ne peut cependant fournir des champs qui soient en totale adéquation avec la pluviométrie réelle. Les imperfections de la méthode tiennent d'abord à l'impossibilité d'obtenir une identification rigoureuse des seuls nuages pluvio-gènes. Les cirrus et les cirrostratus, par exemple, lorsqu'ils sont épais, affichent une température inférieure à celle du seuil de discrimination et entrent donc dans la statistique. Il en va de même des altocumulus non pluvio-gènes, dont les précipitations n'atteignent pas le sol en cas d'atmosphère non saturée en zone subdésertique. Les associations cirrus-altocumulus accompagnent le jet d'altitude. C'est en période hivernale, donc en saison sèche pour la zone soudano-sahélienne, qu'elles sont les plus fréquentes. Elles apparaissent également de manière sporadique en début et en fin de saison des pluies. Leur alignement sud-ouest / nord-est les rend facilement identifiables et permet d'éviter de les confondre avec des nuages pluvio-gènes. Le deuxième inconvénient majeur tient à la variabilité spatiale extrême des pluies d'orage.

Il est donc évident que la cartographie de la fréquence des nuages convectifs durant une période donnée ne peut reproduire avec une parfaite exactitude le champ pluviométrique. Les disparités entre les deux champs sont maximales lorsqu'il ne se produit qu'un seul événement convectif durant la période traitée. En revanche, plus la période est longue, plus le nombre d'occurrences est élevé et plus elles s'estompent, sans toutefois disparaître totalement. L'interprétation des champs d'occurrences de nuages froids en termes de pluviométrie demande par conséquent beaucoup de prudence, plus particulièrement pour les périodes courtes.

Pour lever certaines incertitudes, il faut parfois recourir à la confrontation des images visible et infrarouge de 12 heures TU. Celles-ci sont archivées quotidiennement au CMS sous forme photographique. Elles permettent de déceler l'existence du jet d'altitude et des types de nuages qui lui sont associés.

Un autre moyen de contrôle est fourni par l'utilisation du deuxième outil dérivé lui aussi de l'exploitation des données satellitaires infrarouge : il s'agit de l'évolution de la température de surface au sol.

B) LES FICHIERS DE TEMPÉRATURE DE SURFACE AU SOL

L'idée originale consiste ici à s'intéresser non plus à la "source" de la pluie (les nuages), mais à la "cible" (la surface du sol). Il s'agit en effet de mesurer l'impact de la pluie sur le sol à travers l'évolution de la température de surface. Dans les régions climatiquement contrastées comme celles qui nous intéressent, les variations de la température de surface du sol sont intimement liées à la variation du contenu en eau des sols et au comportement de la végétation.

De manière générale et très schématique, les sols nus et secs se réchauffent et se refroidissent beaucoup plus vite que les sols humides recouverts de végétation active. Mettre en évidence les différences thermiques des sols revient donc à discriminer les zones sèches des zones arrosées. Cette idée n'est pas nouvelle. En s'appuyant sur les travaux de Jackson (1977), Seguin et al. (1982) ont étudié et mis en équation sous une forme approchée la relation physique existant entre la température de surface et la pluviométrie.

Cette approche théorique de la relation pluies / température du sol a été testée au Sénégal dans le courant des années 1984-1986 par les chercheurs de l'IRAT / CIRAD (1). Elle a servi de base "physique" à l'élaboration d'une méthode d'estimation des pluies à partir de la mesure infrarouge Météosat extraite des fichiers réalisés à Lannion (Imbernon et al., 1986, Nègre et al., 1988). Plus récemment l'antenne ORSTOM a également introduit le paramètre température du sol dans son algorithme d'estimation des pluies où il intervient de pair avec le nombre d'occurrences de nuages froids (Carn et al., 1987).

Dans la pratique opérationnelle, la mise en évidence des différences de température passe par la réalisation de "synthèses thermiques" pentadières. Le principe est d'obtenir pour la période incriminée un champ de luminances "claires", c'est-à-dire débarrassé de l'impact des nuages et des aérosols. Un fichier résultat est documenté, image après image, à partir d'un traitement qui ne retient que la température la plus chaude rencontrée au cours de la période sur chacun des pixels du plein disque Météosat. Le

(1) IRAT : Institut de Recherche en Agronomie Tropicale.

CIRAD : Centre International pour la Recherche Agronomique et le Développement.

choix du paramètre température maximum de surface (TMAX), outre l'élimination quasi totale des nuages, a aussi pour avantage de limiter les effets de l'absorption atmosphérique du signal par la vapeur d'eau.

La comparaison des cartes pentadaires permet ainsi de suivre l'installation ou le retrait de la saison des pluies, de repérer les enclaves sèches, ou de déceler les interruptions de saison de pluies. En bref, il est possible de suivre les péripéties de l'hivernage dans toutes les "zones à risques" et ceci à l'échelle synoptique, moyennant, ici encore, quelques précautions d'usage.

Le traitement pentadaire n'élimine pas toujours l'impact des aérosols et, plus rarement, des nuages lorsque leur présence est permanente durant toute la période. Ceci a pour conséquence l'obtention d'une température bien plus fraîche que celle du sol. Le recours à la carte des nuages permet de lever certaines ambiguïtés. Si celle-ci fait état de nuages convectifs, les températures fraîches sont liées à des précipitations. Dans le cas contraire, elles relèvent de la présence permanente d'un manteau d'aérosols ou (et) de nuages non précipitants. Les cas les plus litigieux peuvent être résolus en consultant les images infrarouge et visible de 12 heures TU.

II. - L'HIVERNAGE 1991

Les planches 1 et 2 représentent les images décennales "nuages froids" (*planche 1*) et température radiative maximum au sol (*planche 2*) d'avril à septembre 1991. Ces images, à l'exception de celles d'avril, peuvent être comparées aux moyennes correspondantes établies d'après les fichiers disponibles depuis le début du traitement systématique en 1986. L'intérêt de cette confrontation, dans une optique de suivi opérationnel, est bien entendu de situer la décennie du moment en termes d'anomalies par rapport à la moyenne interannuelle. A plus long terme, la réalisation d'un atlas annuel et interannuel nuages froids et température du sol ouvre des perspectives "médiatiques et pédagogiques" (films vidéo sur le déroulement de la saison des pluies en Afrique), mais aussi des voies de recherche climatologiques (géographie de la convection, influence du relief sur la convection, inter-relations entre convection, végétation et pluviométrie, application au suivi de la "désertification"...).

Les cartes d'occurrences de nuages froids sont exprimées en pourcentage du nombre d'images traitées au cours de la décennie. Les tables de couleur ont été conçues en fonction de la symbolique habituelle de perception visuelle. Par exemple, sur l'image du champ thermique, le chaud, et par conséquent le sec, est représenté dans les tons allant du jaune au noir, tandis que les sols frais apparaissent dans le vert et le bleu. La "frontière" entre les deux catégories est marquée d'une ligne rouge révélant la position de l'isotherme 39° C. L'expérience de six années de suivi et des contrôles de terrain ont montré que cette isotherme avait valeur d'indicateur

pratique entre zones déjà bien arrosées et zones sèches, tout au moins dans la partie continentale de l'Afrique de l'ouest. En revanche, sur la façade maritime (Sénégal et Mauritanie), compte tenu de la pénétration de l'air maritime, la valeur de cet indicateur doit être abaissée à 31° C (B. Guillot, mai 1991).

La conception et la réalisation de ces images, que nous allons commenter sur une base mensuelle, doivent beaucoup à M. Carn et à O. Lemoigne ainsi qu'au logiciel Triskel de D. Dagorne.

AVRIL

La saison des pluies démarre de manière très précoce au sud du Burkina-Faso et au sud du Niger en deuxième et troisième décade du mois. Au Burkina-Faso, notamment, l'isotherme 39° C occupe en troisième décades une position comparable à celle de la moyenne interannuelle 1986-1990 de la troisième décade de mai, révélant ainsi une avance d'un mois par rapport à la normale des années passées.

MAI

Au mois de mai, après une accalmie relative en première décade, exception faite du sud du Tchad, la convection reprend de plus belle en deuxième et surtout troisième décade du mois. En conséquence, les images de nuages froids et de la température du sol de ces deux périodes affichent, en ce début d'hivernage, une physionomie comparable à celle des décades les plus arrosées de la saison des pluies (généralement en août sur le front soudano-sahélien).

Le sud-est et l'est du Mali, tout le Burkina-Faso, une grande partie du Niger et du Tchad se situent au sud de l'isotherme 39° C, donc dans les zones rafraîchies. Cette remontée des nuages froids et de l'isotherme 39° C aux latitudes sahéliennes voire subdésertiques est tout à fait inhabituelle. Comme on pouvait s'y attendre, elle ne s'était pas produite lors des cinq années précédentes ainsi que le montrent les synthèses moyennes des périodes correspondantes (*planches 3 et 4*).

Cela ne veut pas dire pour autant que toutes ces régions aient reçu des précipitations abondantes. Les images de nuages froids permettent, en première analyse, de déceler parmi les zones rafraîchies certaines aires d'extension limitée qui n'ont pas enregistré le passage de nuages convectifs. En second lieu, la signature thermique au sol de fortes précipitations doit se traduire dans les décades suivantes par la persistance de températures fraîches induites par le développement de la végétation. Dès la première décade de juin, la position de l'isotherme 39° C, très décalée vers le sud, montre que tel n'est pas le cas pour le nord-est du Mali, l'Air, le sud-est du

Niger et le Tchad aux latitudes sahéliennes. Le réchauffement observé signifie déficit hydrique et, par conséquent, flétrissement des levées consécutives aux premiers semis. En ce qui concerne le sud du Niger et le Tchad sahélien, le niveau de rafraîchissement atteint fin mai ne se retrouve qu'en deuxième décade de juillet. Cette interruption de la saison des pluies a suscité des inquiétudes quant au déroulement du calendrier agricole, notamment au Tchad.

L'image thermique de la première décade de juin confirme en revanche le maintien de conditions hydriques favorables au développement des pâturages et des cultures sur le sud-est du Mali, l'ensemble du Burkina-Faso et l'ouest du Niger, malgré la rareté des événements convectifs durant cette période. Il est vrai que ces régions ont bénéficié de pluies d'une intensité exceptionnelle à cette époque de l'année comme l'illustrent les quelques données suivantes.

Au Burkina-Faso, par exemple, 12 stations sur 16 du réseau synoptique ont reçu plus de 150 mm de pluie au cours du mois de mai (dont 4 stations à plus de 200 mm). Par rapport au mois de mai 1990, toutes les stations sont excédentaires, sauf Gaoua. Les pourcentages *pluies de mai 1991/pluies de mai 1990* traduisent des écarts énormes, dépassant les 600 % dans les 3 stations les plus arrosées du centre du Pays Mossi (Kamboinsé, Kokologho, Kombissiri), où le cumul mensuel représente environ le tiers de la normale annuelle.

Toujours au Burkina-Faso, la pluviométrie cumulée avril-mai 1991 dépasse largement la moyenne correspondante établie sur la période dite "sèche": 1968-1985. En effet, dans 6 stations sur 9, le pourcentage approche ou dépasse les 200 %. Le "meilleur score" est réalisé à Ouagadougou (300,9 mm pour le cumul avril-mai contre une moyenne de 96,1 mm) (chiffres extraits du Bulletin Régional Mensuel d'Agrhymet de mai 1991).

Pour le Niger, les chiffres correspondants sont aussi impressionnants, tant les pluies de cette année revêtent un caractère extraordinaire, principalement pour l'Air, le Tamesna et le Centre-Sud. Plusieurs stations ont enregistré durant cette même période des pluies dix fois supérieures à la moyenne 1968-1985.

On peut, sans hésitation, conclure que ce début d'hivernage bien arrosé fera date dans la mémoire des paysans et des éleveurs du Sahel burkina-bé et nigérien. Il n'en est pas de même à l'ouest. Aussi bien les images nuages froids que la position stationnaire de l'isotherme 39° C montrent qu'aucun événement pluvio-convectif d'importance ne se produit durant les mois d'avril et mai 1991 au sud du Sénégal, en Gambie et à l'est du Mali. Cette situation témoigne d'un léger retard à l'installation de l'hivernage sur l'extrême sud du Sénégal à la date du 31 mai et d'un retard plus important en Guinée-Bissau et sur le nord de la Guinée, selon la lecture des synthèses moyennes 1986-1991.

JUIN

En comparaison des deuxième et troisième décades de mai, les trois décades de juin apparaissent peu fertiles en événements convectifs. La première décade est incontestablement la moins favorisée en ce qui concerne la zone soudano-sahélienne. Le taux de convection très faible implique une très grande probabilité de faible pluviométrie et d'irrégularités dans la répartition. Certaines avancées du front de convection comme en Mauritanie et à l'est du Mali en première décade, ou au Mali et au Niger en deuxième décade, posent problème. Dans le premier cas, la présence de nuages froids est associée à un net refroidissement de la signature thermique des sols. Le recours aux images suivantes montre que le rafraîchissement disparaît, et qu'en tout état de cause les pluies n'ont pas été abondantes sur ce secteur. Dans le deuxième cas, les nuages froids sont certes présents, mais aucun rafraîchissement du sol n'est constaté en deuxième décade ou en troisième décade : manifestement, ces nuages n'étaient pas pluvieux.

Globalement, au 30 juin, la saison des pluies reste bien installée au sud du Mali, sur l'ensemble du Burkina-Faso et le sud du Tchad. Une légère progression de l'isotherme 39° C est notée au sud du Sénégal et au Tchad où elle est associée à une intensification de l'activité convective jusqu'à la latitude du lac. La plus grande partie de la Gambie et du territoire sénégalais, toute la Mauritanie, la plus grande partie du Mali, dont la bande Kayes-Mopti-Tombouctou, l'Aïr et le sud-est du Niger restent en saison sèche.

JUILLET

Les images de nuages froids de juillet montrent quelques changements importants dans la physionomie de la convection, surtout à partir de la deuxième décade. Ils sont liés à une forte poussée de l'anticyclone de Sainte-Hélène en direction de l'hémisphère nord. Celle-ci est reconnaissable à la disparition des nuages convectifs sur le Golfe de Guinée et les pays riverains, synonyme de mise en place de la petite saison sèche du Sierra Leone au Ghana. Elle a également pour conséquence une poussée vers le nord de la masse d'air humide de mousson, provoquant le développement de nombreux épisodes convectifs aux latitudes sahéliennes jusqu'ici peu ou pas touchées, si ce n'est au mois de mai. Le sud du Sénégal, l'est du Mali (Kayes-Nioro du Sahel) enregistrent un très fort taux de convection en première décade de même que le centre-sud du Niger. Cette dernière région étendue cette fois jusqu'au lac Tchad bénéficie à nouveau d'une bonne couverture nuageuse convective en deuxième et troisième décades. Il en va de même pour le Mali durant ces mêmes périodes, ainsi que pour le Burkina et le Tchad sahélien en troisième décade.

Si l'on se réfère maintenant aux images décadaires de température du sol de juillet, force est de constater une bonne progression, de décade en

décade, de l'isotherme 39° C vers le nord, celle-ci épousant en troisième décade le front de convection. Une nouvelle phase très pluvieuse débute et va se prolonger jusqu'au mois d'août. Un nouvel essor est donc donné à l'activité agricole et au développement des pâturages quasiment stoppés après plusieurs décades sèches consécutives dans certaines régions.

Le taux de convection sur la moitié nord du Sénégal demeure des plus faibles pendant les trois décades. La basse vallée du fleuve, de Saint-Louis, à Podor, doit attendre la fin de juillet pour voir ses premiers nuages froids et ses premières pluies. La Mauritanie, après avoir connu quelques événements pluvieux précoces et localisés, connaît une reprise des pluies en deuxième et surtout en troisième décades de juillet, date à laquelle l'isotherme 39° C se positionne au nord du fleuve.

AOUT

L'activité convective s'est maintenue à un niveau d'ensemble très satisfaisant durant le mois d'août sur la plupart des pays de la zone soudano-sahélienne. Deux pays font cependant exception en première et en deuxième décades. Il s'agit du Sénégal, où le taux de convection reste des plus faibles, et de la Mauritanie où le front de convection demeure dans une position plus méridionale que celle qu'il occupait pendant la période précédente. L'extrême sud du pays ainsi que le sud et l'est du Sénégal bénéficient cependant d'un très bon taux de convection en deuxième décade. Il faut cependant attendre la troisième décade pour voir le front de convection remonter jusqu'au nord de la Mauritanie et observer des valeurs élevées d'occurrences de nuages froids sur l'ouest du Sénégal. Il en résulte de bonnes pluies sur ces régions. Ce sont parfois les premières de la saison comme à Rosso et Nouakchott. Ailleurs, il s'agit d'une reprise des pluies après plusieurs décades très sèches comme à Boutilimit, Akjoujt, Aleg, Moudjeria en Mauritanie, ou Saint-Louis, Richard-Toll et Louga au Sénégal.

Si l'on se réfère maintenant à la position de l'isotherme 39° C, on y constate une certaine stabilité par rapport à celle occupée fin juillet. Il apparaît cependant que la vallée du Sénégal demeure encore au nord de l'isotherme 31° C. Par conséquent, fin août, le démarrage de l'activité agricole et de la végétation reste des plus incertains dans ce secteur. Cette région a bien souffert d'un fort déficit convectif et cela durant les trois décades comme le montre la comparaison avec les images moyennes (*planche 3*).

SEPTEMBRE

Le mois de septembre est habituellement riche en occurrences de nuages convectifs sur le Sénégal et la Mauritanie (*planche 3*). Cette année, la norme est respectée en première décade et à un degré moindre en deuxième décade. Elle ne l'est pas du tout en troisième période du mois, période pendant laquelle le taux de convection s'effondre non seulement sur l'ouest du Sahel, mais aussi dans les autres pays.

Les images thermiques rendent compte de cette évolution. En première décennie, l'isotherme 31° C épouse le tracé du fleuve Sénégal et, plus à l'est, celui de la frontière Mali / Mauritanie. En deuxième décennie, il se situe franchement au sud de cette limite et, dès la troisième décennie, le nord du Sénégal et quasiment toute la Mauritanie sont déjà au nord de l'isotherme 39° C. Cette évolution est aussi spectaculaire sur les pays de l'est du Sahel puisqu'en troisième décennie, le centre-nord du Mali, le nord du Burkina-Faso, tout le Niger et le Tchad au nord de la latitude de N'Djamena entrent dans la catégorie des sols secs et chauds. Cette position reste néanmoins tout à fait comparable à celle de la moyenne des années 1986-1990 en ce qui concerne le Burkina, le Niger et le Tchad. Cette situation ne peut donc engendrer d'inquiétudes quant à la fin du cycle de maturation des récoltes tardives. Tel n'est pas le cas en revanche sur la moitié nord du Sénégal et sur la Mauritanie. L'isotherme 31° C se situe, à la fin du mois de septembre, sur une position habituellement occupée en deuxième décennie d'octobre (*cf. planche 4*), c'est dire que les réserves hydriques des sols sont déjà épuisées et que le cycle agricole, qui n'a démarré en de nombreux endroits que trois semaines auparavant, ne pourra aller à son terme et que toutes ces régions sont ou seront incapables d'assurer elles-mêmes leurs besoins alimentaires (2).

CONCLUSION

En conclusion, il importe de faire la synthèse du déroulement de la saison et d'apprécier les résultats de la campagne agricole. Les paramètres à notre disposition sont ceux qui peuvent être déduits de la comparaison des images décennales de l'année et des moyennes interannuelles. Ce sont donc les dates de démarrage de la saison suivant la région, la durée des séquences sèches intermédiaires, les dates de reprise des pluies, la durée des séquences pluvieuses et l'intensité relative des précipitations, les dates de la mise en place de la saison sèche.

La saison des pluies démarre très précocement au Burkina-Faso et à l'ouest du Niger dès la fin du mois d'avril. Après une légère accalmie en première décennie de mai, ces mêmes régions, auxquelles il faut ajouter le sud-est du Mali, l'Aïr et le Tamesna nigériens ainsi que le nord du Tchad sahélien, enregistrent une reprise de l'activité convective d'une intensité tout à fait exceptionnelle pour l'époque de l'année.

Certaines de ces régions subissent par la suite une période de sécheresse prolongée qui provoque le flétrissement de la végétation herbacée et des levées consécutives aux premiers semis : tel est le cas du Tchad sahélien et du sud-est du Niger qui ne retrouvent la convection qu'en première décennie

(2) Ce texte et les images qui l'accompagnent ont été préparés en octobre 1991. Nous avons, par la suite, pu constater une reprise de l'activité convective sur l'ensemble du territoire sénégalais et sur le sud de la Mauritanie en première décennie. En deuxième décennie, seule la moitié sud du Sénégal reste concernée par des nuages à sommet froid. En troisième décennie, aucun épisode convectif n'est enregistré sur ces pays.

de juillet ; tel est aussi le cas du nord-ouest du Niger et de l'Aïr où les précipitations ne reviennent qu'à partir de la troisième décennie de juillet et cessent dès la première décennie de septembre.

Le sud du Mali, le Burkina-Faso dans son ensemble, l'ouest du Niger, le sud du Tchad, hormis une pause de l'activité convective en première décennie de juin, bénéficient de très bonnes conditions, jusqu'au terme de notre étude, en troisième décennie de septembre. La fin de l'hivernage sur ces régions, à l'exception du Niger, n'est pas brutale comme cela peut arriver certaines années. L'activité convective de septembre, certes décroissante, reste cependant suffisante pour générer quelques faibles pluies utiles en fin de maturation des variétés de mil tardif.

Au nord-est et au centre du Mali dit " agricole ", de Kayes à Mopti, le déroulement de l'hivernage est beaucoup moins harmonieux. Il débute bien plus tardivement, en première décennie de juillet, et se poursuit de manière très irrégulière jusqu'à la deuxième décennie de septembre.

A l'ouest de cette zone, les conditions de l'hivernage ont été encore plus difficiles. La saison démarre bien plus tardivement que de coutume, en juin pour la Guinée-Bissau, début juillet pour la Casamance et la Gambie, en troisième décennie de juillet pour la moitié nord du Sénégal. Dans cette dernière région, on peut même parler d'absence d'hivernage puisque les deux décennies suivantes sont très pauvres en événements convectifs, plus particulièrement sur la basse vallée du fleuve. Le taux de convection n'est ici satisfaisant que pendant la dernière décennie d'août et la première de septembre. La plupart des stations de la moitié nord du Sénégal n'ont donc connu que deux ou trois décennies bien arrosées. C'est trop peu pour assurer la réussite du cycle agricole : les récoltes seront forcément médiocres ou inexistantes. Les mêmes conclusions s'appliquent à la Mauritanie, sauf sur la frange sud-est où le bilan convectif est meilleur.

On aboutit ainsi à une reconnaissance des zones critiques essentiellement limitées en 1991 à l'ouest du Sahel et pour lesquelles il importe de faire jouer les solidarités nationales et internationales, tant au niveau de l'aide alimentaire que de celui de l'approvisionnement en semences pour la future campagne 1992.

BIBLIOGRAPHIE

- ARKIN (P.), 1979. – The relationship between fractional cloud coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over B-scale array. *Month. Weath. Rev.*, 107, pp. 1382-1387.
- ASSAD (E.), 1987. – *Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne. Cas du Sénégal*. Thèse hydrologie, Montpellier, 260 p.
- BELLE (B.), GUILLOT (B.), NOYALET (A.), 1985. – Surveillance de la convection intertropicale. Extraction de nuages à sommet froid et étude de leur répartition géographique, du 11 mai au 10 juin 1985. *Veille Clim. Sat.* n° 8, juillet, Lannion, pp. 17-22.

- CARN (M.), DAGORNE (D.), GUILLOT (B.), LAHUEC (J.-P.), 1987. – Estimation des précipitations par satellite au Sahel pour la période de mai à septembre 1987. *Veille Clim. Sat.* n° 20, Lannion, pp. 26-30.
- CARN (M.), DAGORNE (D.), GUILLOT (B.), LAHUEC (J.-P.), 1990. – Estimation des pluies et suivi de l'hivernage 1990 en Afrique de l'ouest soudano-sahélienne à travers un catalogue d'images mensuelles. *Veille Clim. Sat.* Lannion, n° 34, pp. 24-31.
- GUILLOT (B.), 1985. – Le programme Veille Climatique Satellitaire. *La Météorologie*, Boulogne, VII^e série, n° 9, pp. 60-63.
- GUILLOT (B.), mai 1991. – Champs thermiques en Afrique de l'ouest de mars à mai 1991. *Veille Clim. Sat.* Lannion, n° 37, pp. 16-25.
- GUILLOT (B.), juin 1991. – Champs thermiques de surface en Afrique de l'ouest en juin-juillet 1991. *Veille Clim. Sat.* Lannion, n° 38, pp. 31-35.
- GUILLOT (B.), septembre 1991. – Champs thermiques de surface en Afrique de l'ouest en août-septembre 1991. *Veille Clim. Sat.* Lannion, n° 39, pp. 16-25.
- IMBERNON (J.), ASSAD (E.), GUILLOT (B.), DAGORNE (D.), 1986. – Evaluation de la pluviométrie par cumul des images infrarouge thermique Météosat (Sénégal), 1986. *Veille Clim. Sat.* Lannion, pp. 49-57.
- JACKSON (R.-D.), REGINATOR (J.), IDSO (S.-B.), 1977. – Wheat canopy temperature. A practical tool for evaluating Water requirements. *Water Resour. Res.*, 13 (3), pp. 651-657.
- LAHUEC (J.-P.), GUILLOT (B.), BELLEC (B.), 1986. – Relationship between deep convection and rainfall in Africa. *Proceedings of the 6th Météosat Sci. User's Meet.*, Amsterdam, 25-27 nov. 1986, vol. 2.
- LAHUEC (J.-P.), mai 1991. – Convergence intertropicale. L'intensité de la convection en juin-juillet 1991. *Veille Clim. Sat.*, Lannion, n° 37, pp. 26-43.
- LAHUEC (J.-P.), juillet 1991. – Convergence intertropicale. L'intensité de la convection de mars à mai 1991. *Veille Clim. Sat.*, Lannion, n° 38, pp. 17-30.
- LAHUEC (J.-P.), septembre 1991. – Convergence intertropicale. L'intensité de la convection en août-septembre 1991. *Veille Clim. Sat.*, Lannion, n° 39, pp. 9-15.
- NÈGRE (T.), IMBERNON (J.), GUINOT (J.-P.), SEGUIN (B.), BERGES (J.-C.), GUILLOT (B.), 1988. – Estimation et suivi de la pluviométrie au Sénégal par satellite Météosat. *L'Agronomie Tropicale*, 43, 4, pp. 279-288.
- MILFORD (J.-R.), DUGDALE (G.), 1989. – Estimation of rainfall using geostationary satellite data. In *Applications of Remote Sensing in Agriculture. Proceedings of 48th Easter School in Agricultural Science*, University of Nottingham, July 1989, Butterworth, London.
- SEGUIN (B.), BAEZ (S.), MONGET (J.-M.), PETIT (V.), 1982. – Utilisation de la thermographie infrarouge pour l'estimation de l'évaporation régionale. Mise au point méthodologique sur le site de la Crau. *Agronomie*, 2 (1), pp. 7-16.
- SAVANE (M.), SEGUIN (B.), GUILLOT (B.), 1989. – Utilisation des synthèses thermiques Météosat étalonnées par NOAA-AVHRR en agroclimatologie : Application à la France. *Veille Clim. Sat.*, n° 31, Lannion, pp. 55-60.
-