

Analyse de la Variabilité du Régime Pluviométrique dans la Région Agricole d'Ina au Bénin

Lawin Agnidé Emmanuel

*Université d'Abomey – Calavi, Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA)
01 BP 526 Cotonou (Bénin)
E-mail: ewaari@yahoo.fr*

Afouda Abel

*Université d'Abomey – Calavi, Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA)
01 BP 526 Cotonou (Bénin)
E-mail: aafouda@yahoo.fr*

Lebel Thierry

*Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)
BP 53 Rue de la Piscine Grenoble (France)
E-mail: thierry.lebel@hmg.inpg.fr*

Résumé

Pour documenter la variabilité du régime pluviométrique de la région agricole d'Ina au Bénin, une analyse du cycle saisonnier des précipitations a été faite à l'aide des données de pluies journalières de la station d'Ina sur la période 1950-2003. La méthode des moyennes glissantes a permis de déterminer la dynamique du cycle moyen saisonnier. La recherche de tendance a été faite par la mise en œuvre d'un test statistique paramétrique puis d'un test non paramétrique. L'analyse des composites sec et humide du signal pluviométrique montre que le déficit pluviométrique des années sèches est surtout marqué après le «saut de mousson». De même, les années sèches se caractérisent par un retrait précoce de la mousson qui semble avoir débuté à partir de 1970. Par ailleurs, les années après 1970 connaissent un décalage des pics de précipitations de 18 jours environs. Ces pics sont atteints précocement.

En outre, la distribution des intensités de pluie au cours d'une période récente (1999 – 2003) a été faite grâce aux données à haute résolution temporelle de la station pluviographique du réseau AMMA-CATCH (Analyse multidisciplinaire de la Mousson Africaine – Couplage de l'Atmosphère tropicale et du cycle Hydrologique) installée à Ina.

Mots clés: Mousson, précipitation, variabilité, séquences sèches, intensité.

Abstract

The seasonal cycle of precipitations is analyzed to provide more information on rainfall regime variability in the Ina agricultural region. Daily rainfall data of Ina rain gauge for the period 1950 – 2003 are processed by using the moving average over a period

of eleven days method to determine the mean seasonal cycle dynamic. Trend in the data is analyzed by applying two statistical tests. The first one is a parametric test and the other one is a non parametric. Dry and humid composite analysis of the rainfall signal shows that the pluviometric shortage of dry years is amplified after the “monsoon onset”. On the same way, dry years are characterized by early monsoon withdrawal which might have started since 1970.

Furthermore, processing high temporal resolution data of the Ina rain gauge from AMMA-CATCH (Analyse multidisciplinaire de la Mousson Africaine – Couplage de l'Atmosphère tropicale et du cycle Hydrologique) network, allows accessing, for the first time, the distribution of rainfall intensity in Ina region for the recent period (1999 – 2003).

Keywords: Monsoon, rainfall, variability, dry sequences, intensity.

1. Introduction

La présente étude rentre dans le cadre des efforts déployés pour comprendre la variabilité du climat Ouest – Africain, marqué surtout par une sécheresse sévère au Sahel depuis la fin des années 60s avec des pics en 1972 – 1974 et 1983 – 1985. Cette sécheresse, s'est étendue vers le golfe de guinée mais avec une moindre rigueur (Le Barbé *et al.*, 2002).

En effet, la pluviométrie régionale a subi une baisse de 20% sur la période 1971 – 1990 par rapport à la période 1950 – 1970, entraînant une baisse de près de 40% des écoulements pour la même période sur l'ensemble du Bénin (Le Barbé *et al.*, 1993). Plusieurs études se sont concentrées sur la variabilité climatique régionale. Mais très peu d'études, surtout récentes sont disponibles sur la variabilité à l'échelle d'une station.

Ce travail se propose d'analyser la variabilité du régime pluviométrique à l'échelle d'une station en comparaison avec l'échelle régionale pour mettre en relief les questions d'échelles à considérer lorsqu'on s'intéresse à la variabilité pluviométrique. La station pluviométrique d'Ina sur l'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO) a été choisie pour deux raisons. D'une part, Ina est une région de cultures vivrières et de rentes. D'autre part, nous disposons de relevés de pluies journalières sur environ soixante années. Par ailleurs Ina est équipée d'une station pluviographique automatique qui dispose de données à fine échelle temporelle permettant d'analyser la distribution des intensités de pluie sur la décennie récente.

2. Données et Méthodes

2.1. Cadre Physique et Données de l'étude

La région agricole d'Ina est l'aire géographique délimitée par l'arrondissement d'Ina. Ce domaine physique dispose d'une station climatologique installée à Ina. Les observations de cette station sont représentatives du climat de l'arrondissement. Ina est située dans une région dénommée Observatoire Hydrométéorologique de la Haute vallée de l'Ouémé (OHHVO). Cette région est située au Bénin, entre les latitudes 9°N et 10°N et les longitudes 1.5°E et 2.8°E (Figure 1) et couvre une superficie de 15000 km² environ. Le climat de la région est de type soudanien avec une saison des pluies allant de mi-mars à fin octobre et un cumul annuel moyen de 1200 mm sur la période 1954-2005 (Le Lay et Galle 2005; Lawin 2007).

Deux types de réseaux d'observations pluviométriques sont disponibles (Tableau 1) dans la région de l'OHHVO: un réseau synoptique et un réseau expérimental. Le réseau synoptique appartient au réseau opérationnel national géré par le Service de la Météorologie Nationale (SMN). Ce réseau permet d'étudier la variabilité pluviométrique à l'échelle synoptique. Nous l'avons donc utilisé pour

analyser les traits caractéristiques moyens du régime pluviométrique de la région de l'OHHVO sur la période 1954-2006.

La station pluviométrique d'Ina, qui appartient au réseau synoptique, a été installée en 1947. Elle dispose donc de données de pluies journalières sur la période 1947 à 2003. Mais compte tenu des lacunes trop importantes au cours de certaines années (lacunes sur plusieurs mois au cours de la saison des pluies), nous avons considéré la période allant de 1950 à 2003 sur laquelle quatre années, notamment 1990, 1994, 1995 et 1999, ont été supprimées. Ainsi cinquante années sont prises en compte pour cette station du réseau du SMN dans nos analyses sur la période 1950 – 2003.

Le réseau expérimental, géré par le programme AMMA-CATCH, permet d'accéder à des résolutions spatiales et temporelles fines. Il offre de ce fait, la possibilité de documenter plus finement la distribution des intensités de pluie à l'échelle de la station. De ce réseau récent (installé à partir de 1997), la station installée à Ina est utilisée pour analyser la distribution intra – saisonnière des précipitations à l'échelle ponctuelle sur la période 1999 - 2003.

Figure 1: Localisation de la station d'Ina (Rond plein) sur l'OHHVO. Les stations de Parakou (au Sud) et de Djougou (à l'Ouest) y sont également marquées (rond vide)



Tableau 1: Les deux types de réseaux d'observations pluviométriques disponibles sur l'OHHVO

Réseaux	Type d'appareils	Nombre	Densité	Date de début d'installation	Résolution temporelle
Synoptique	Pluviomètres	12	1250 km ² / station	1921	Journalière
Expérimental	Pluviographes	47	318 km ² / station	1997	Quelques minutes

2.2. Méthodes D'analyse des Données

2.2.1. Détermination des Années Humides et Sèches

La variabilité interannuelle du régime pluviométrique peut être analysée à partir de la distribution des années humides et des années sèches. Mais les définitions d'une année humide (ou excédentaire) et d'une année sèche (ou déficitaire) sont très diverses. En effet, on peut définir une année humide ou sèche, soit par rapport aux quantiles, soit par rapport aux écarts types ou, en pourcentage, par rapport à la médiane ou encore à la moyenne. Dans la présente étude, une année humide ou une année sèche est

définie par rapport à l'indice de Lamb (l'écart à la moyenne normalisé par l'écart type) qui s'exprime par: $I(i) = (P(i) - \bar{P}) / \sigma$ où $P(i)$ représente le cumul moyen annuel obtenu par krigeage sur la région OHHVO ou à la station d'Ina pour l'année i , \bar{P} et σ représentent respectivement, la moyenne et l'écart type de la série considérée.

Ainsi, une année sera considérée comme normale si son indice est compris entre -0,1 et +0,1. Elle sera dite humide si son indice est supérieur à 0,1 et sèche en deçà de -0,1. Cet intervalle reste critiquable puisqu'il est relativement faible de sorte que les années normales sont très peu nombreuses. Mais il permet de bien distinguer les années sèches et les années humides.

2.2.2. Analyse de la Variabilité Interannuelle du Cumul Pluviométrique

Pour rechercher ce qui expliquerait la variabilité interannuelle observée du régime pluviométrique local, nous avons analysé la corrélation entre l'indice pluviométrique calculé à la station d'Ina et les indices calculés sur quatre autres paramètres notamment:

- le nombre de jours pluvieux (un jour est déclaré pluvieux au-delà d'un seuil minimum de pluie enregistrée de 0,1 mm à la station);
- la pluie moyenne par jour pluvieux;
- la plus longue séquence sèche observée au cours de la saison des pluies (du 15 mars au 31 octobre);
- le cumul maximum journalier.

2.2.3. Recherche des Modifications du Cycle Saisonnier

Pour analyser plus finement les modifications du cycle saisonnier des précipitations à l'échelle locale, nous avons mis en œuvre la méthodologie proposée par Le Lay et Galle (2005) en rééchantillonnant notre série en quatre composites (figure 9): P1H et P2H, constitués respectivement des 7 années les plus humides des périodes 1950 – 1969 et 1970 – 2003; P1S et P2S constitués respectivement des 7 années les plus sèches des périodes 1950 – 1969 et 1970 – 2003.

2.2.4. Tests de Tendance

Pour vérifier la pertinence de la tendance observée au niveau des précipitations à Ina, deux tests statistiques de natures paramétrique et non paramétrique ont été mis en œuvre et ont permis de comparer les résultats des périodes 1950 – 1969 et 1970 – 2003.

Le premier test utilisé, et qui est de nature paramétrique, est l'écart réduit (Gremy et Salmon 1969) dont les résultats sont résumés dans le tableau 3. La statistique ER (Ecart Réduit) est comparée à la valeur t qui est de 1,96 au risque de 5% et de 2,6 au risque de 1%.

$$ER = \frac{|m_1 - m_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}} \quad (1)$$

Avec:

m_1 et m_2 : moyennes pluviométriques interannuelles des deux périodes considérées;

σ_1^2 et σ_2^2 : variances des deux séries;

N_1 et N_2 : nombre d'années par séries.

La significativité de la différence des deux moyennes a été vérifiée par le calcul de la statistique T de Student et la probabilité τ que les deux séries correspondantes soient de moyennes significativement différentes.

$$T = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N_1-1} (x_i - m_1)^2 + \sum_{i=0}^{N_2-1} (y_i - m_2)^2}{N_1 + N_2 - 2} \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right)}} \quad (2)$$

Avec x et y désignant respectivement les séries 1950 – 1969 et 1970 – 2003. L'hypothèse H_0 : x et y ont des moyennes significativement égales est acceptée si τ est supérieur à 5%.

Le second test effectué est de type non paramétrique. Il s'agit du test de Mann – Kendall, pour mesurer le degré de significativité de la tendance observée dans la série. Pour sa mise en œuvre, on calcule pour chaque terme de la série, le nombre de termes précédents qui lui sont inférieurs. La statistique m est la somme des nombres ainsi calculés. Dans l'hypothèse nulle d'absence de tendance, la moyenne est égale à:

$$E(m) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (3)$$

et la variance est égale à:

$$V(m) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

La valeur m notée ici θ sera comparée à $E(m)$ par la statistique:

$$U = \frac{|\theta - E(m)|}{\sigma} \quad (5)$$

où:

U : suit une loi normale réduite;

σ : est l'écart type de la série.

La différence entre m et $E(m)$ sera significative au risque de 5% si U est supérieur à 1,96 et hautement significative au risque de 1% si U est supérieur à 2,57.

2.2.5. Analyse des Données Pluviographiques de la Station AMMA – CATCH d'Ina

Les enregistrements pluviographiques instantanés de la station AMMA – CATCH d'Ina ont permis d'accéder à l'échelle fine des intensités de pluie. A partir des dates de basculement d'auget, on accède non seulement aux intensités de pluie mais également à la durée effective de pluie (Lebel *et al.* 1996). Dès lors, la relation entre la durée effective de pluie et les quantiles du cumul annuel ainsi que la relation entre intensité de pluie et quantile du cumul annuel ont été analysées et les résultats sont présentés aux figures 10 et 11.

3. Résultats et Discussions

3.1. Quelques Caractéristiques de la Variabilité Régionale

3.1.1. Le Cycle Saisonnier

On utilise ici les pluies moyennes journalières obtenues par krigeage (Matheron 1965, 1970; Delhomme 1976) sur l'ensemble de la région (réseau synoptique) pour analyser la distribution intrasaisonnière des précipitations sur la période 1954 – 2006 (figure 2). La saison des pluies s'installe sur la région à partir de Mars – Avril et se retire en fin Octobre avec trois pics de précipitation. Le deuxième renforcement des précipitations commence fin juin (27 juin) et correspond à ce qui a été décrit comme le saut de mousson ou « onset » (Sultan et Janicot 2003). Le maximum de précipitation est atteint vers fin Août (le 27 Août).

La variabilité du cycle saisonnier entre les années excédentaires et les années déficitaires de la période 1954 – 2006 (figure 3) montre, comme l'avait déjà signalé Le Lay et Galle (2005), que la dynamique des saisons excédentaires est pratiquement identique à celle des années déficitaires à la différence que les années déficitaires se caractérisent par: i) un déficit pluviométrique marqué surtout

dans la seconde phase de la mousson (c'est – à – dire après le saut de mousson) et ii) un retrait précoce de la mousson se traduisant par une chute brutale des précipitations dès début septembre.

Figure 2: Cycle saisonnier moyen des pluies observées sur l'OHHVO de 1954 à 2006. Les moyennes sont calculées sur des fenêtres glissantes de 3 jours, de 5 jours, de 7 jours et de 11 jours. Pic1, Pic2 et Pic3 représentent les trois pics de précipitation.

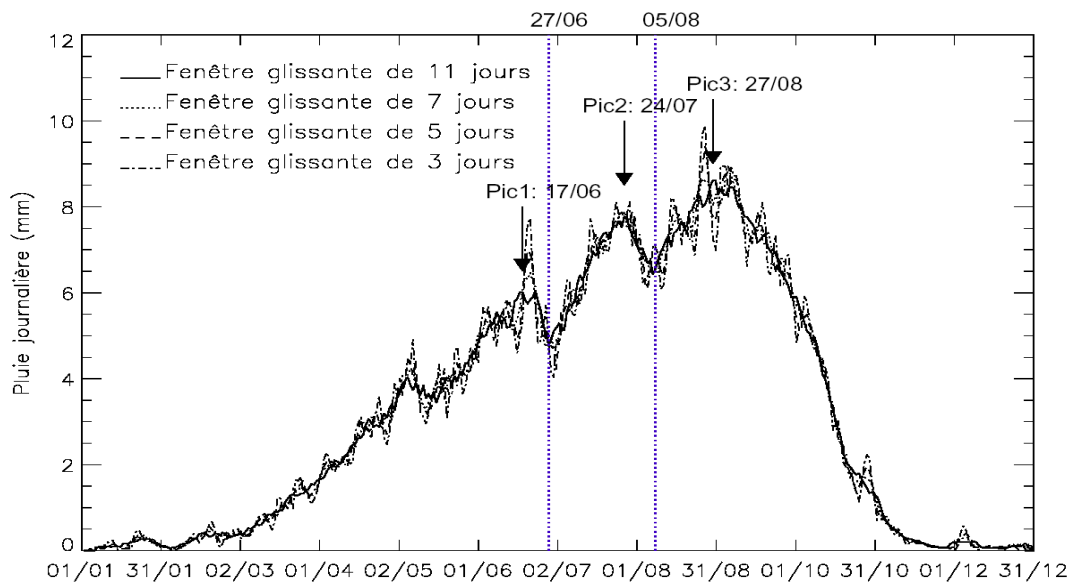
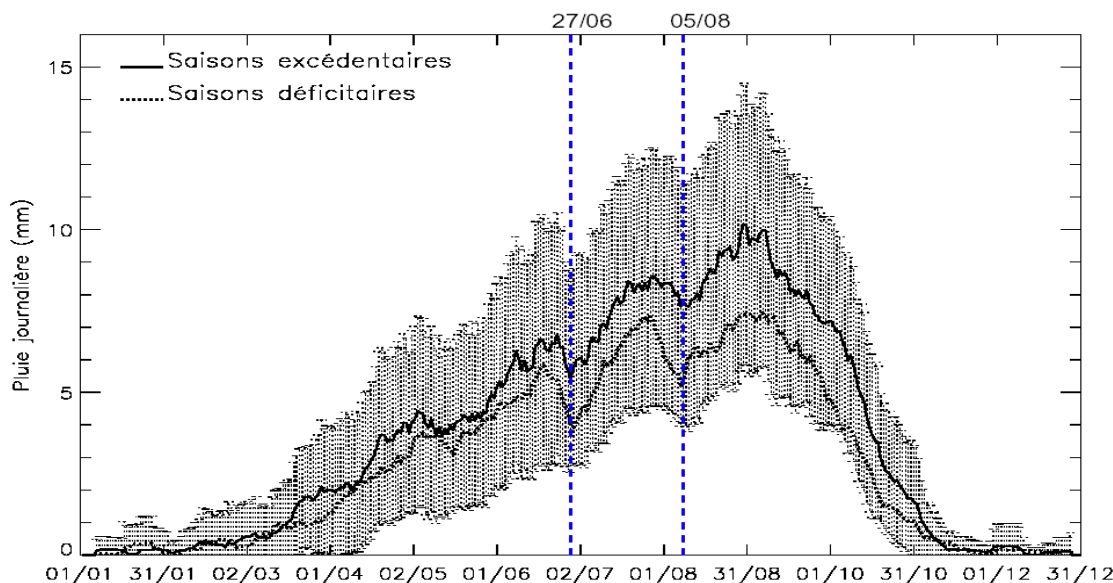


Figure 3: Cycle saisonnier moyen des saisons excédentaires et des saisons déficitaires pour la période 1954 – 2006. Les moyennes sont calculées sur des fenêtres glissantes de 11 jours. Les barres verticales en pointillés représentent les écarts types du composite des saisons excédentaires.

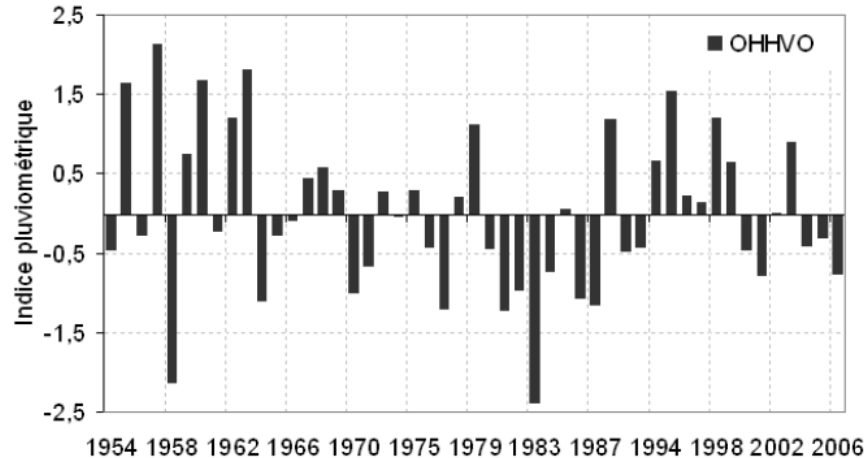


3.1.2. Variabilité Interannuelle

Le régime pluviométrique régional (Figure 4) est marqué par une forte fluctuation interannuelle se superposant à la variabilité décennale. La période 1954 – 2006 est marquée par deux années fortement déficitaires (1958 et 1983). Après 1970 on observe une augmentation, non seulement de la fréquence des années sèches mais aussi de l'amplitude de sécheresse par rapport à la période d'avant. Les années 80s sont particulièrement sèches avec le pic de sécheresse de 1983. Les années 90s semblent bien

humides mais d'amplitudes plus faibles qu'au cours de la décennie 50. La dernière décennie semble entrer dans une phase déficitaire (phase sèche) car depuis 2000, en dehors de l'année 2003 humide, toutes les autres années sont sèches. Mais, la définition d'une année sèche ou humide reste aussi liée à l'échelle spatiale que l'on considère.

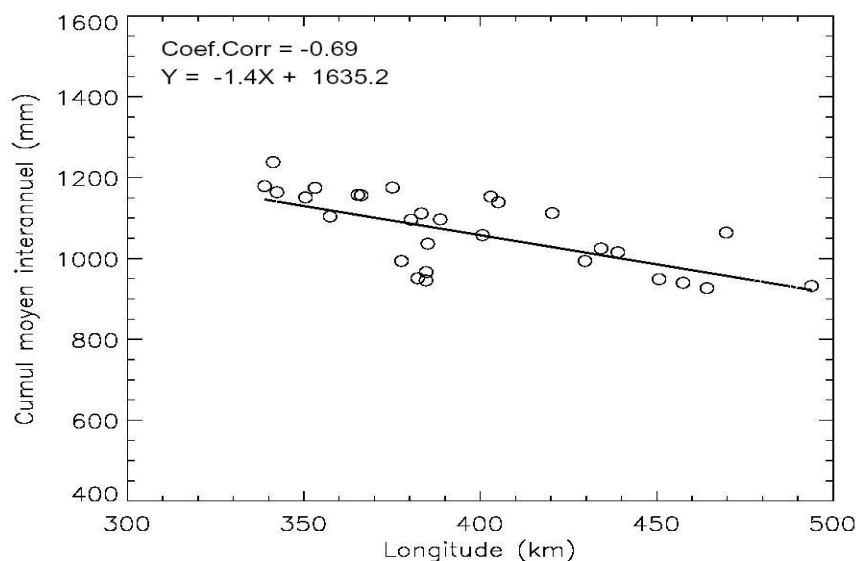
Figure 4: Variabilité interannuelle des précipitations dans la région de l'OHHVO



3.1.3. Variabilité Spatiale des Cumuls Pluviométriques Annuels

L'organisation spatiale des champs annuels de précipitation, saison par saison ne montre aucun gradient pluviométrique bien marqué dans une direction privilégiée. Mais, on constate toutefois que la zone Nord-Ouest semble être plus arrosée chaque année, indépendamment du caractère déficitaire (sec) ou excédentaire (humide) de l'année. En revanche, en cumulant les champs de pluie sur plusieurs années, le champ moyen cumulé obtenu présente un léger gradient longitudinal (Figure 5). La comparaison de l'organisation de ce champ avec le champ moyen d'intermittence permet de déduire que le nombre d'événements qui touchent une station donnée est un facteur déterminant du cumul saisonnier. Ce résultat concorde bien avec ce qui a été mis en évidence plus au Nord sur les pluies sahéliennes (Le Barbé et Lebel 1997; d'Amato et Lebel 1998).

Figure 5: Gradient longitudinal de précipitation dans la région de l'OHHVO



3.2. Variabilité à l'échelle Ponctuelle: Station d'Ina

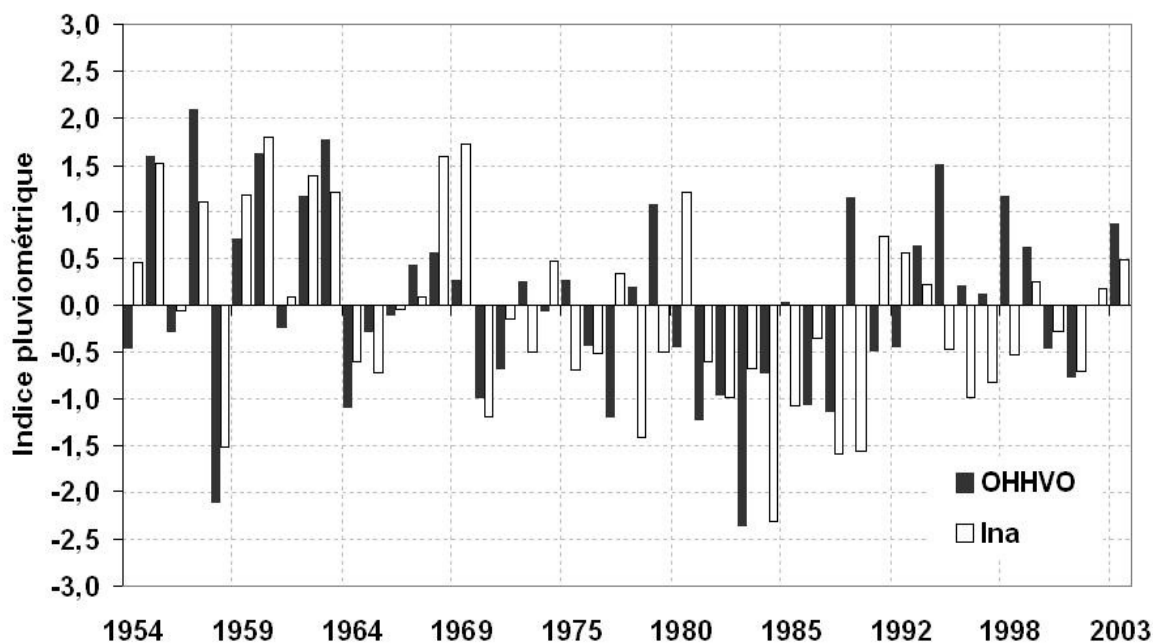
3.2.1. Analyse de la Variabilité Interannuelle

A la station climatologique d'Ina, compte tenu de la disponibilité de données à l'échelle de l'OHHVO, toutes nos analyses ont porté ici sur la période 1954 à 2003 afin de pouvoir faire la comparaison entre la méso – échelle et l'échelle ponctuelle. L'analyse de l'évolution du cumul annuel par rapport à la moyenne interannuelle de la période 1954 – 2003, à travers l'indice pluviométrique de la station, montre (Figure 6) six années particulièrement déficitaires dont une avant 1970 (notamment l'année 1958) et cinq années à partir de 1970 qui sont: 1970, 1978, 1984, 1987 et 1988.

Comme à l'échelle de la région, le signal pluviométrique est marqué par une forte fluctuation interannuelle. On note toutefois que la période post 1970 est marquée par une augmentation de la fréquence des années sèches. La période 1980 à 1990 se caractérise par une succession sans interruption d'années largement déficitaires (par rapport à la moyenne interannuelle) de 1981 jusqu'en 1988 avec le maximum de déficit en 1984.

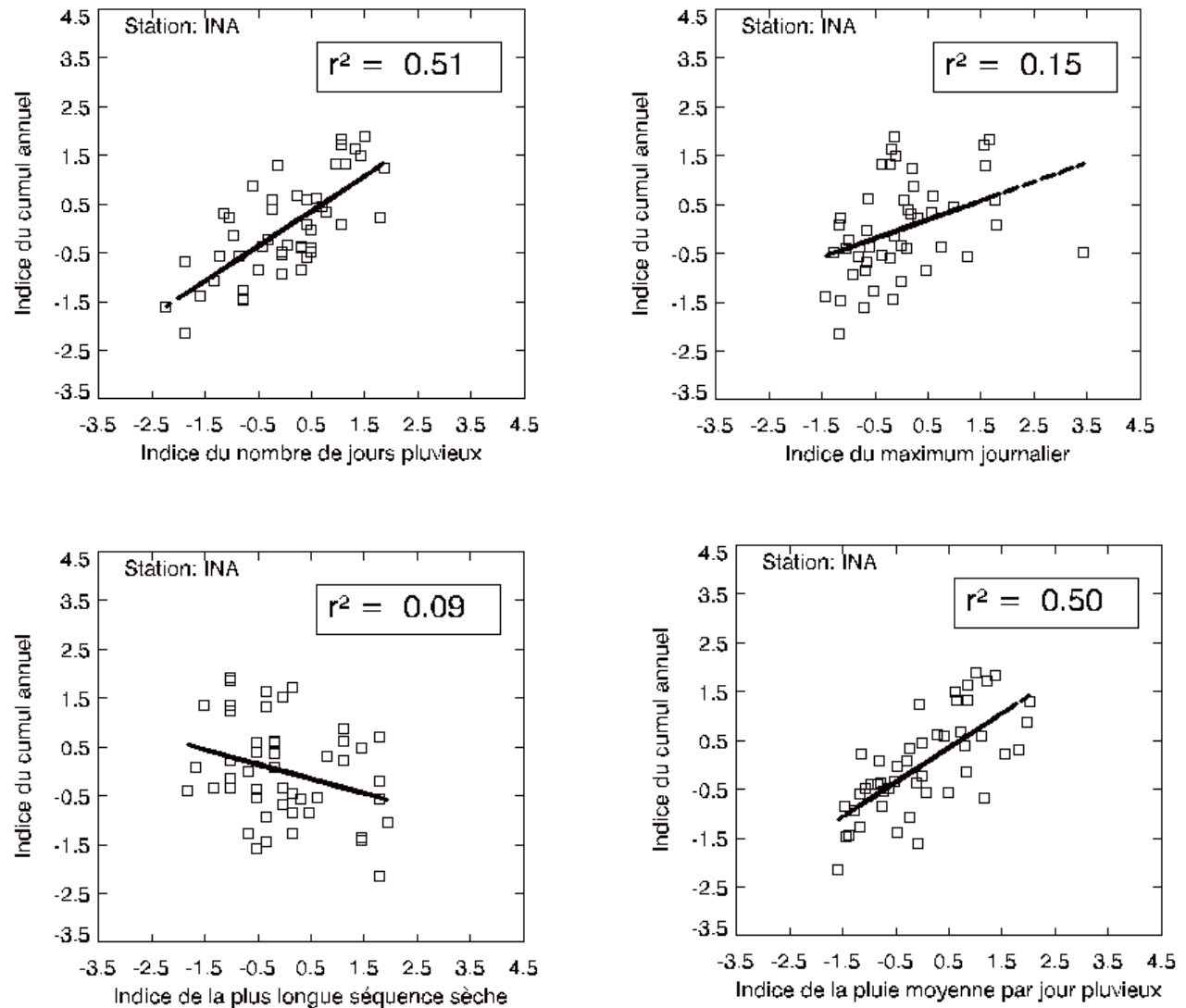
En comparant l'indice pluviométrique calculé à la station d'Ina à celui calculé pour toute la région de l'OHHVO, la figure 6 confirme que le concept d'année sèche ou humide dépend effectivement de l'échelle spatiale que l'on considère. En effet, l'année 1983 qui est particulièrement déficitaire à l'échelle de la région ne l'est que moyennement à Ina. Par ailleurs, l'année 1979 particulièrement humide sur l'OHHVO est moyennement sèche à Ina et l'année 1980, moyennement sèche sur l'OHHVO, est particulièrement humide à Ina.

Figure 6: Indice pluviométrique calculé à la station climatologique d'Ina en comparaison avec l'indice calculé sur la région OHHVO



A partir de l'analyse de corrélation effectuée entre l'indice pluviométrique et les indices des quatre autres paramètres considérés (Figure 7), on constate que le nombre de jours pluvieux explique mieux la variabilité du cumul annuel.

Figure 7: Corrélation entre l'indice pluviométrique à Ina et les indices de quatre autres paramètres (nombre de jour pluvieux, maximum journalier, plus longue séquence sèche et pluie moyenne par jour pluvieux).

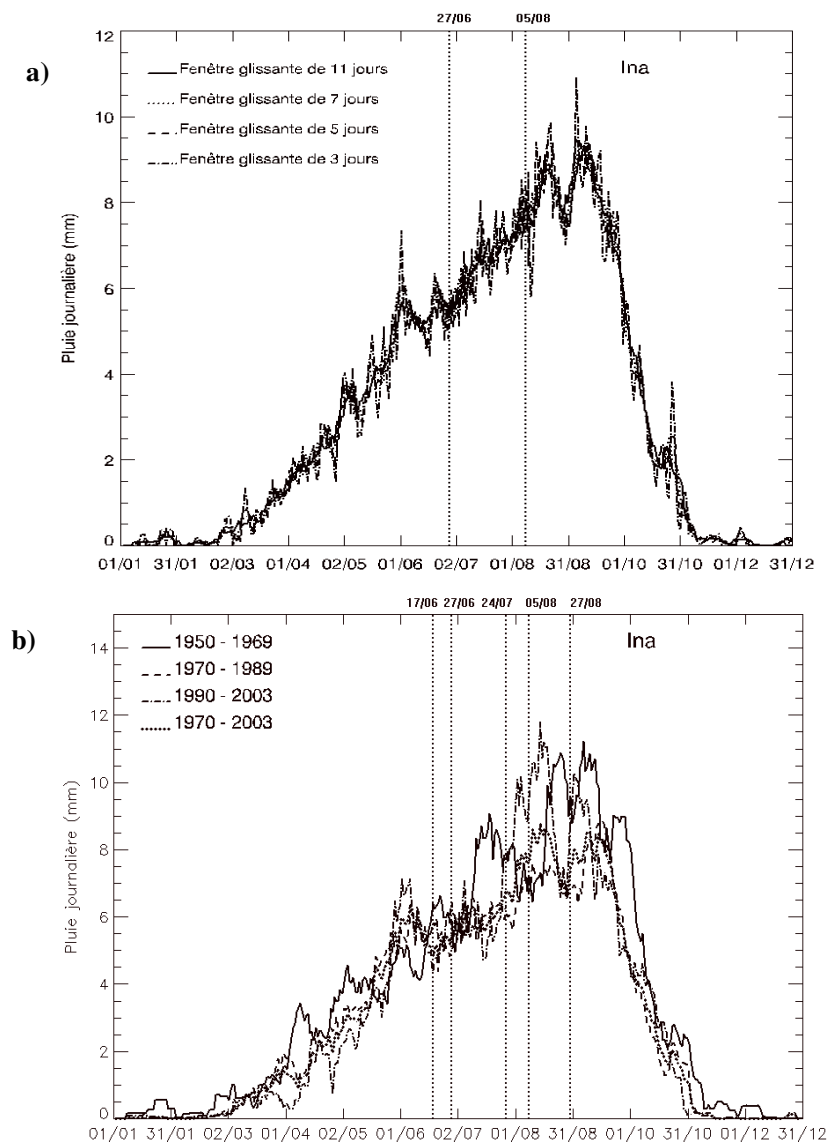


Ce résultat confirme bien celui mis en évidence par Le Barbé *et al.* (2002), à l'échelle de la région, à savoir que la variabilité du cumul annuel est plus liée à celle du nombre d'événements plutôt qu'à la quantité de pluie par événement pluvieux. La figure 7 montre également une liaison entre le cumul annuel et la pluie moyenne par jour pluvieux mais, ce résultat n'est pas systématiquement observé aux autres stations situées dans le domaine de l'OHHVO.

3.2.2. Le cycle Saisonnier à l'échelle Locale

Le cycle saisonnier à la station d'Ina est unimodal comme à l'échelle régionale. Les pluies s'installent à partir d'Avril et se retirent en fin octobre. Le maximum de précipitation (11 mm/jr) est atteint en Août – Septembre (figure 8.a). L'analyse comparative des périodes 1950 – 1969 et 1970 – 2003 (figure 8.b) montre que la période post 1970 se distingue de la période d'avant par un déficit pluviométrique marqué au cœur de la saison, atteignant 18,2 % en Août. Par ailleurs, on observe le retrait plus rapide des précipitations au cours de cette dernière période.

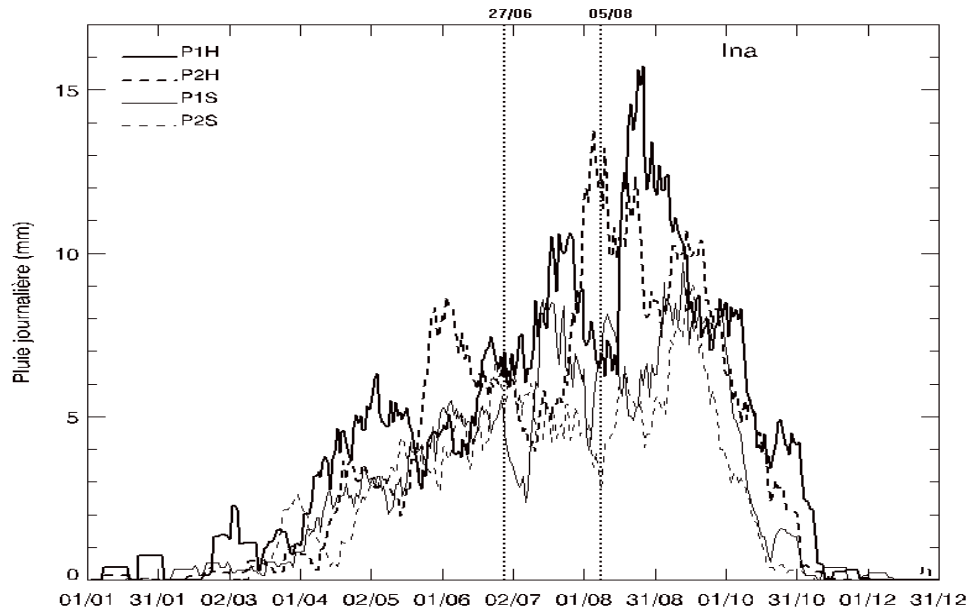
Figure 8: Cycle saisonnier moyen à la station d'Ina (a) et cycle saisonnier moyen sur les sous périodes 1954 – 1969 et 1970 – 2003 (b)



L'analyse des quatre composites (figure 9) fait apparaître un décalage de 18 jours du pic de précipitation entre les composites humides (P1H et P2H) et une baisse de ce pic de 13 %. Le pic est atteint précocement pour le composite P2H. Ce déplacement du pic de précipitation peut avoir des conséquences sur le développement végétatif normal des cultures. En effet, certaines cultures risquent de subir une surabondance d'eau à un moment où elles n'en ont pas besoin si tant et un déficit hydrique au moment où elles ont besoin d'assez d'eau. Ce qui peut avoir des conséquences dramatiques sur le rendement des cultures. Par ailleurs le composite P2H se caractérise par un début de précipitation plus renforcé en début juin (pic de pluie dépassant 8 mm/jr) par rapport au composite P1H.

Concernant les composites secs (P1S et P2S), on observe un retrait précoce des précipitations qui est plus accentué pour le composite des années sèches après 1970. Ainsi, les années déficitaires se particularisent par le retrait précoce des précipitations.

Figure 9: cycle saisonnier moyen des composites humides (P1H et P2H: 7 années les plus humides avant 1970 puis après 1970) et secs (P1S et P2S: 7 années les plus sèches avant 1970 puis après 1970).



3.3. Distribution des Années Sèches et Humides

Au total, sur les cinquante années considérées à la station d'Ina (entre 1950 et 2003), il n'y a que deux années moyennes. La série comporte plus d'années sèches (25 années) que d'années humides (23 années). Mais la différence reste faible. La faible fréquence des années moyennes est certainement tributaire de l'intervalle très restreint retenu pour définir l'année moyenne.

Du point de vue hydrologique, il est évident qu'une année sèche a un effet différent selon qu'elle succède à une année sèche ou à une année humide. D'où l'intérêt d'analyser la succession des années sèches afin de vérifier si le nombre de séquences sèches augmente entre les périodes 1950 – 1969 et 1970 – 2003. A cet effet, les séquences sèches par classes de longueurs allant d'une année à huit années ont été dénombrées. Les résultats sont consignés dans le tableau 2. Ces résultats montrent que les séquences sèches dépassent rarement trois années. Mais il peut avoir exceptionnellement des séquences sèches de huit années comme c'est le cas pour la décennie la plus sèche (1980 – 1989). La décennie la plus humide (1950 – 1959) se caractérise par très peu de séquences sèches et de longueur faible. Par ailleurs, les séquences sèches de longueur égale à trois années se distribuent uniquement sur la décennie 70.

Tableau 2: Fréquence des séquences sèches à Ina par décennies et par sous – périodes.

Longueur des séquences (années)	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-2003	1950-1969	1970-1989
1	2	0	0	0	0	2	0
2	0	1	2	0	1	1	2
3	0	0	1	0	0	0	1
4	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0	1
Moyenne	1	2	2,33	8	3	1,33	3,75

La moyenne des séquences sèches est de deux années au plus sur les décennies 50 et 60 tandis qu'elle est de trois années environ pour les décennies 70 et 90. Ces résultats montrent que c'est la décennie 80 qui est plus responsable de la tendance à l'assèchement observée sur la période 1970 – 1990, avec huit années successivement sèches. Les séquences sèches demeurent plus longues sur la période 1990 – 2003 comparativement aux décennies 50 et 60 ou même 70.

En comparant les sous – périodes 1950 – 1969 et 1970 – 1989, on observe que le nombre moyen de séquences sèches a significativement augmenté puisqu'il a pratiquement triplé en passant de 1,33 à 3,75. Cette augmentation traduit certainement une tendance à la baisse des précipitations qui est vérifiée par des tests statistiques.

3.4. Recherche de Tendance

De l'analyse des résultats du test d'écart réduit effectué (tableau 3), il ressort que la pluviosité moyenne a effectivement diminué à Ina entre les deux périodes (1950 – 1969 et 1970 – 2003), quelque soit le seuil de sécurité considéré. La variation est de 18% et elle est légèrement plus faible que celle de 20 % mise en évidence entre la période 1971 – 1990 et la période 1950 - 1970 par Le Barbé *et al.* (2002) sur l'ensemble du pays.

Le résultat de la statistique de Student donne $T = 4,2$ et $\tau = 0,01\%$. D'où l'hypothèse H_0 est rejetée et par conséquent, les deux séries (1950 – 1969 et 1970 – 2003) ont des moyennes significativement différentes.

Par ailleurs, on note dans le tableau 3 que la variabilité n'est pas plus importante sur une période par rapport à l'autre. De même, le rapport entre le maximum et le minimum de précipitation reste stable autour de 2.

Le test non paramétrique (tableau 4) a abouti aux mêmes résultats que le test paramétrique et l'analyse des séquences sèches. En effet, au risque de 5% (donc au seuil de sécurité de 95%), ces résultats mettent en évidence une nette tendance à la baisse de la pluviométrie sur la période post 1970 à Ina. En revanche, il faut noter qu'au seuil de sécurité de 99%, la tendance n'est pas nette.

Tableau 3: Ecart réduit entre les deux périodes considérées

Périodes	1950 - 1969	1970 - 2003
Nbre d'années	20	30
Moyenne	1329,6	1096,8
Rapport Maxi/Mini	1,9	2,1
Coefficient de variation (%)	6,2	6,4
$ m1-m2 /m1$ (%)	18	
Ecart – réduit (ER)	4,06	

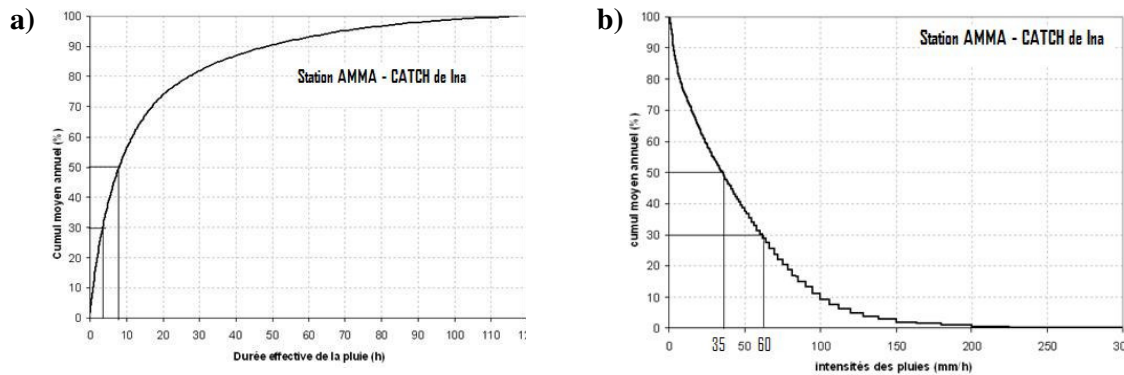
Tableau 4: Résultats du test de Mann - Kendall

θ	$E(m)$	$V(m)$	σ	U
459	588	3364,67	58,01	2,22

3.5. Distribution des Intensités de Pluie

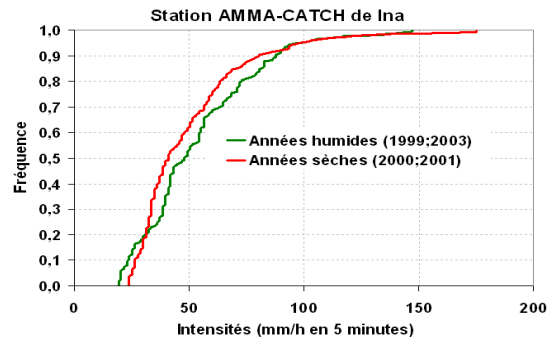
Il ressort du traitement des données pluviographiques (figure 10) que 50 % du cumul annuel de pluie tombe en moins de 8 heures avec une intensité supérieure à 35 mm/h et 30 % du cumul annuel de pluie tombe en moins de 4 heures avec une intensité supérieure à 60 mm/h. Ces statistiques, indépendantes du caractère excédentaire ou déficitaire de la saison, sont très utiles non seulement pour la modélisation hydrologique, mais aussi pour des études comme l'érosion des sols et l'échantillonnage des pluies par satellite.

Figure 10: Relation entre les quantiles du cumul annuel et la durée effective de pluie (a) puis les intensités de pluie (b).



Par ailleurs, l'une des questions auxquelles les données à fine échelle temporelle permettent de répondre est de savoir si l'augmentation de la fréquence des années déficitaires a un impact sur les intensités de pluie. La figure 11 montre que la distribution des fortes intensités est pratiquement identique pour les années déficitaires et les années excédentaires. Les années déficitaires ne semblent pas se distinguer des années excédentaires par une diminution de l'intensité de la convection.

Figure 11: Distribution fréquentielle des plus fortes intensités pour deux années excédentaires et deux années déficitaires



4. Conclusions

Dans cette étude, nous avons analysé dans un premier temps, à l'échelle régionale, le cycle saisonnier des précipitations ainsi que la variabilité interannuelle et la variabilité spatiale. On a observé que le cycle saisonnier est unimodal et que les pluies s'installent sur la région à partir de mars – Avril et se retirent en fin octobre. La dynamique des saisons excédentaires est pratiquement identique à celle des années déficitaires à la différence que les années déficitaires se caractérisent par un déficit pluviométrique très marqué après le saut de mousson et un retrait précoce de la mousson se traduisant par une chute brutale des précipitations dès début septembre. Du point de vue spatiale, le champ moyen présente un léger gradient longitudinal qui semble biaisé aux bords du domaine d'étude. Ce léger gradient semble être expliqué par le nombre d'événements pluvieux plutôt que par la pluie moyenne par événement pluvieux.

A l'échelle ponctuelle, l'analyse fine du cycle saisonnier a permis de mettre en évidence la baisse et le déplacement de 18 jours du pic de précipitation qui est atteint précocement sur la période post 1970. Ce décalage du pic de précipitation peut avoir des conséquences néfastes sur le rendement des cultures et menacer ainsi la sécurité alimentaire. La connaissance de ce déplacement du pic de

précipitation et sa baisse, couplée au retrait précoce des pluies également mis en évidence sur la période post 1970 peut permettre aux agronomes de réaménager les calendriers de semis des cultures.

La distribution des séquences sèches a permis de montrer une augmentation du nombre moyen de séquences sèches qui a pratiquement triplé entre les sous – périodes 1950 – 1969 et 1970 – 1989. La décennie 1980 – 1989 est la plus responsable de l'augmentation des séquences sèches. Cette augmentation a eu pour conséquence une tendance à la baisse des précipitations annuelles qui a été vérifiée par des tests statistiques (un test paramétrique puis un test non paramétrique). Tous les tests effectués s'accordent sur la tendance à la baisse des précipitations à Ina avec une rupture de stationnarité en 1970.

Enfin, l'utilisation des données à fine échelle temporelle de la station AMMA – CATCH d'Ina a permis d'accéder à l'échelle des intensités de précipitation et la relation entre le caractère sec ou humide de l'année et l'intensité de la convection analysée. Il en ressort que les années déficitaires ne se distinguent pas des années excédentaires par une diminution de l'intensité de la convection. Mais il convient de noter que l'exploitation de données de taille plus grande permettra de confirmer ce résultat qui a déjà été mis en évidence par d'autres auteurs sur les pluies sahéliennes.

Par ailleurs, ces données ont permis de déterminer des statistiques (comme par exemple 50% du cumul annuel tombe avec une intensité supérieure à 35 mm/h) qui sont très utiles dans le cadre d'études sur l'érosion des sols ou l'échantillonnage des précipitations par satellite.

Références

- [1] d'Amato, N. & T. Lebel, 1998. "On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to analysis of climatic variability". *International Journal of Climatology* 18, pp. 955-974.
- [2] Delhomme, J.P., 1976. "Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau". *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6 129p.
- [3] Gremy, F. and D. Salmon, 1969. "Bases statistiques. Sciences mathématiques au service de la médecine". Dunod edition, Paris.
- [4] LAWIN A. E., 2007. "Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la Haute Vallée de l'Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin". *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Grenoble, France. 231p.
- [5] Le Barbe L. and T. Lebel, 1997. "Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990". *Journal of Hydrology* 188, pp. 43-73.
- [6] Le Barbe L., T. Lebel and D. Tapsoba, 2002. "Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990". *Journal of Climate* 15 pp. 187-202.
- [7] Le Barbe L., G. Alé, B. Millet, H. Texier, Y. Borel and R. Gualde, 1993. "Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin". *Ed. ORSTOM*, Paris, France. 540p.
- [8] Le Lay M. and S. Galle, 2005. "Variabilité interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien". *Journal des Sciences Hydrologiques* 50, pp. 509-524.
- [9] Lebel T., A. Amani, F. Cazenave, J. Lecoq, J. D. Taupin, E. Elguero, M. Greard, L. Le Barbe, H. Laurent, N. d'Amato and J. Robin, 1996. "La distribution spatio-temporelle des pluies au sahel: apports de l'expérience EPSAT-Niger". *IAHS Publication* 238, pp. 77-98.
- [10] Matheron G., 1970. "La théorie des variables régionalisées et ses applications". *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontaine Bleau*. Fascicule 5, 212p.
- [11] Matheron G., 1965. "Les variables régionalisées et leur estimation". *Masson et Cie*, Paris. 305p.
- [12] Sultan B. and S. Janicot, 2003. "The West African monsoon dynamics. Part 2: The 'preonset' and 'onset' of the summer monsoon". *Journal of Climate* 16, pp. 3407-3427.