

ANALYSE DE LA VARIABILITE HYDROCLIMATIQUE ET IMPACTS DES BARRAGES SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE D'UNE RIVIERE DE ZONE SEMI-ARIDE : LE SEBOU AU MAROC.

HYDROCLIMATIC VARIABILITY AND IMPACTS OF DAMS ON THE HYDROLOGICAL FLOW OF THE SEMI-ARID RIVER: THE SEBOU IN MOROCCO.

**BAHIN YOLI BAUDET EUDES*

Laboratoire : Géosciences et Ressources Naturelles, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Campus Maamora BP 133, 14000 Kenitra, Maroc.

eudesbahin@yahoo.fr

+212630090666

HAIDA SOUAD

Laboratoire : Géosciences et Ressources Naturelles, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Campus Maamora BP 133, 14000 Kenitra, Maroc.

Souad_hs_haida@yahoo.com

+212666979410

PROBST JEAN-LUC

ENSAT-INPT, UMR ECOLAB, Avenue de l'Agrobiopole, AuzevilleTolosane, BP 32607, 31326 CASTANET TOLOSAN Cedex, France

Jean-luc.probst@ensat.fr

+33(0)5 34 32 39 49 / +33 (0)6 75 26 96 36

RESUME

L'analyse et la caractérisation de la variabilité hydroclimatique sur une longue période s'avèrent fondamentales pour la compréhension des impacts des changements climatiques et de la vulnérabilité des régimes hydrologiques. Ce présent travail a consisté à étudier la variabilité spatio-temporelle des séries climatiques et hydrologiques dans le bassin versant du Sebou (Maroc) au cours des soixante dernières années à partir du filtre passe-bas d'ordre 2 de Hanning et des tests statistiques de détection de rupture. Cette étude statistique a permis d'analyser l'évolution spatio-temporelle des débits et des pluies au niveau de trois stations hydrométriques dont Azib Es Soltane, et Mechra Bel Ksiri contrôlant respectivement le Moyen Sebou et le Bas Sebou et M'jara sur l'Ouerrha qui est le principal affluent du Sebou.

Les résultats de ce travail montrent que le climat a connu de fortes fluctuations interannuelles avec une succession de périodes sèches et humides au cours de la période entre 1939 et 1979 et une baisse générale des précipitations sur toute la région étudiée à partir des années 80. L'analyse des débits a permis d'identifier des ruptures en 1978 à Mechra Bel Ksiri et M'jara et en 1972 à Azib Es Soltane. Ces ruptures ont engendré un déficit sur le Sebou à l'aval d'environ 50% et sur le Moyen Sebou à 70%. Les résultats du bilan hydrologique mettent en évidence une forte perte en eau sur l'Ouerrha à M'jara allant jusqu'à 90% à partir de 1996, date de mise en service du barrage Al Wahda. L'analyse de la relation pluie/débit met en évidence la forte influence de la régularisation des régimes des cours d'eau, qui dans le cas du bassin versant du Sebou, l'emporte sur l'effet climatique.

Les résultats de cette étude constituent des indicateurs importants pour l'évaluation des risques climatiques conjugués aux effets des barrages sur des rivières très vulnérables aux changements climatiques.

Mots-clés : variabilité hydroclimatique, tests statistiques, Barrages, Bassin versant du Sebou

ABSTRACT

The analysis and characterization of hydroclimatic variability over a long period of time is fundamental for understanding the impacts of climate change and vulnerability of hydrological regimes. The present work is a study of the spatial and temporal variability of the climatic and hydrological series in the Sebou river basin (Morocco) over the past sixty years using Hanning low-pass filter of second order and statistical tests of stationarity of climate and hydrological time series. These statistic testing methods were applied to analyze the spatial and temporal evolution to the hydroclimatologic data of the AzibEsSoltane, M'jara and MechraBelKsiri hydrometric stations, which are, respectively, located in the Middle Sebou, the Ouerrha Tributary of the Sebou and the Low Sebou.

This analysis shows that climate variability has resulted particularly in strong interannual fluctuations in rainfall reflected by a succession of dry and wet periods between 1939 and 1979 and a general decrease in precipitation since 1980. The Water flow time series analysis are marked by ruptures detected mainly between 1972 and 1978 reflecting rainoff declines of about 50% in the Sebou downstream and 70% in the middle Sebou. Several decreases in water discharge (up to 90%) were also detected in the Ouerrhariver since 1996, when the Al Wahda dam started operating. The analysis of the relationships between rainfall and water discharge shows that the impacts of dams constructions are stronger than the climatic effect in the Ouerrha river. The results of this study are important indicators for the assessment of combined climate risks.

Key words: *Hydroclimatic variability, statistical tests, Dams, Sebou watershed*

1- INTRODUCTION

La variabilité des conditions climatiques est désormais l'une des préoccupations majeures dans le monde aussi bien pour les scientifiques que pour les pouvoirs politiques. Les précipitations représentent la majeure composante du climat et sont les plus concernées par la variabilité de leurs régimes aux échelles saisonnières annuelles et interannuelles.

Dans le contexte actuel des changements climatiques, la variabilité des précipitations se caractérise par la fréquence des événements extrêmes qui sont marqués par des années très sèches où des années très humides. Ces événements extrêmes sont prudemment imputés au changement climatique et sont considérés à l'heure actuelle comme de la variabilité interannuelle naturelle du climat (NORRANT, 2007). Ces changements climatiques abordés à l'échelle mondiale, ont fait l'objet d'études plus ciblées en Afrique de l'Ouest et Centrale (PATUREL et al., 1997 ; KOUASSI et al., 2010) et au Sahel [(LE BARBE et LEBEL., 1997 ; LEBEL et al., 2003)].

Au Maroc, un des enjeux majeurs de la recherche sur la variabilité climatique est de quantifier son impact sur les ressources en eau, le milieu naturel et les secteurs socio-économiques. Une analyse de la variabilité pluviométrique au Maroc a bien montré, ces dernières années, une tendance à la sécheresse (TRAMBLAY et al., 2012), avec une fréquence apparente de ces périodes sèches au niveau des régimes hydrologiques des différents bassins versants marocains (HAIDA et al., 1999 ; BOUAICHA & BENABDELFADEL, 2010).

Pour faire face à cette pénurie des ressources en eau, le Maroc a très tôt donné une grande importance aux aménagements hydrauliques et à la mobilisation des ressources en eau. Le bassin versant du Sebou est l'un des principaux bassins hydrauliques ayant bénéficié de ce programme d'aménagement avec environ 13 barrages et un ouvrage de transfert d'eau appelé Complexe de Matmata, réalisé entre 1989 et 1991 (CERVATTI et al.,-1990). Ce bassin versant a aussi connu la mise en eau en 1997 du barrage Al Wahda dont la capacité de sa retenue le place comme le 2^{ème} plus grand barrage en Afrique.

*L'impact des aménagements hydrauliques associés aux changements climatiques attendus sur les écoulements superficiels dans ce bassin, soulèvent de nombreuses questions quant aux mesures d'adaptation nécessaires, notamment au niveau de la régulation des débits par les grands ouvrages destinés au soutien en étiage, à l'écrêtement des crues ou encore à la production de l'énergie électrique. Le bassin a déjà fait l'objet de travaux d'analyses des impacts de la variabilité climatique et des activités anthropiques jusqu'en 1996 avant la mise en eau du barrage Al Wahda (HAIDA, 2000). Dans la suite de ces travaux, l'objectif principal de cette étude est de considérer le bassin du Sebou comme un observatoire des **hydrosystèmes** fluviaux en Afrique en suivant l'impact des changements climatiques et des activités anthropiques.*

2- PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant du Sebou couvre une superficie de 40000 km² au Nord-Ouest du Maroc, entre les méridiens 4° et 7° Ouest et les parallèles 33° et 35° Nord. Il s'intègre dans le domaine morphogénétique d'âge alpin et se présente sous forme d'une cuvette entre le massif du Rif au Nord s'élevant à 2450 m, la chaîne du moyen Atlas et la Meseta au Sud, le couloir Fès-Taza à l'Est et l'Océan Atlantique à l'Ouest (Figure 1).

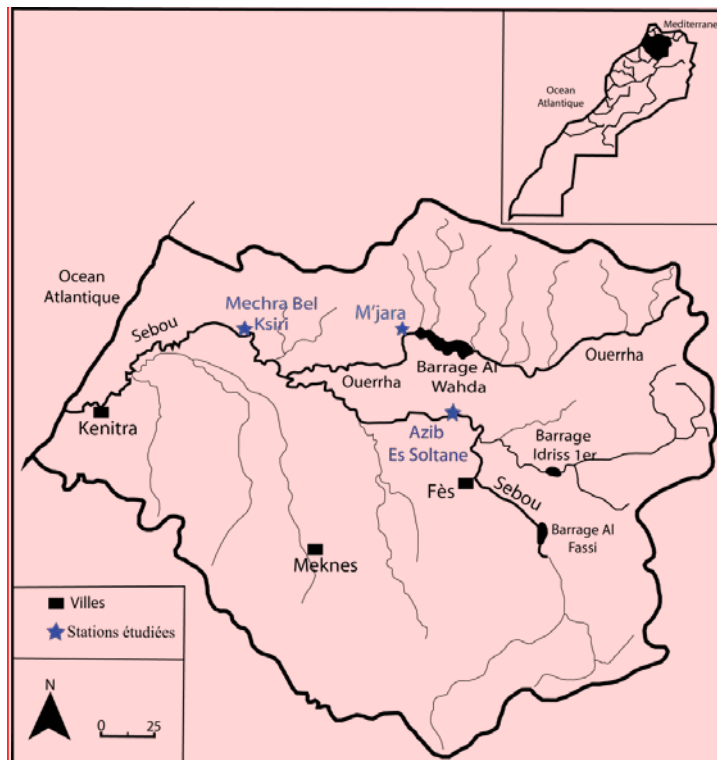


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Sebou (ABHS, 2011)

Le bassin du Sebou est ouvert à l'ouest sur l'océan atlantique, au nord proche de la méditerranéenne et au sud-est dominé par une dépression aride. Son climat est de type méditerranéen à influence atlantique, méditerranéenne et continentale saharienne.

La moyenne annuelle des précipitations dans le bassin versant du Sebou est d'environ 640 mm. Elle diminue en s'éloignant de la mer vers la vallée du Behtth et

Comment [D1]: Cette limite à revoir. Le couloir Fès-Taza n'est pas dans la limite est du bassin. le bassin Hydraulique de la Moulouya.

Comment [D2]: Océan au lieu de Ocean , Méditerranée au lieu de Mediteranee Insérer l'unité de l'échelle graphique, Océan au lieu ocean

Comment [D3]: Changer stations étudiées par stations d'observation

sur le haut Sebou avec une moyenne de 400 à 550 mm de pluie, et augmente rapidement sur les versants du Rif atteignant un maximum de 1000 à 1500 mm/an.

3- MATERIEL ET METHODES

3.1 - Acquisition des données

Les principales données utilisées dans ce travail sont : la pluviométrie annuelle et les débits liquides annuels mises à notre disposition par l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou (ABHS). Les données de débits liquides et de pluie utilisées sur l'oued Sebou concernent les stations hydrologiques de Mechra Bel Ksiri (de 1966 à 2015 pour les pluies et de 1939 à 2013 pour les débits liquides) et Azib Es Soltane (de 1962 à 2015 pour les pluies et de 1939 à 2013 pour les débits liquides), sur son principal affluent Ouerrha à la station M'jara (de 1959 à 2013 pour les pluies et de 1939 à 2007 pour les débits liquides).

3.2- Méthodes

La méthode utilisée dans ce travail a déjà fait l'objet de travaux antérieurs dans différents bassins versants comme celui de la Lobo Centre Ouest de la Côte d'Ivoire (YAO et al., 2012), de l'Oubangui au Centre Afrique (NGUIMALET et ORANGE, 2015) et aussi au Maroc sur l'Oum Er Rbia (JOUILIL et al., 2013). Elle consiste dans un premier temps à mettre en évidence la variabilité climatique et hydrologique et dans un second temps de déduire la part climatique de celle anthropique sur les régimes hydrologiques.

3.2.1- Etude de la variabilité temporelle des précipitations et des débits

La mise en évidence de variabilité climatique et hydrologique par l'indice de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d'ordre 2 permet à travers l'exploitation de données pluviométriques et hydrométriques obtenues pour une longue série de mesures de mettre en évidence les tendances climatiques et hydroclimatiques et de différencier les périodes sèches des périodes humides (SORO et [Alal.](#), 2011).

- Indice de NICHOLSON

L'indice de Nicholson calculé pour chaque année est exprimé par l'équation suivante (NICHOLSON et al., 1988) :

$$I_i = (X_i - X_m) / \alpha \quad (1)$$

Avec X_i = hauteur de pluie en mm (ou débit en m^3/s) de l'année i ,

X_m = hauteur de pluie en mm (ou débit en m^3/s) moyenne sur la période d'étude,

α = écart-type de la hauteur de pluie (ou débit) sur la période d'étude.

- Filtre passe bas de HANNING d'ordre 2

Le Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, appelée aussi moyenne mobile pondérée, permet d'éliminer les variations saisonnières dans une série chronologique. Pour ce faire, les totaux pluviométriques et de débits sont pondérés suivant l'équation 2 (ASSANI, 1999) :

$$X_{(t)} = 0,06x_{(t-2)} + 0,25x_{(t-1)} + 0,38x_{(t)} + 0,25x_{(t+1)} + 0,06x_{(t+2)} \quad (2)$$

pour $3 \leq t \leq (n-2)$

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers termes $[X_{(1)}, X_{(2)}]$ et des deux derniers termes $[X_{(n-1)}, X_{(n)}]$ sont obtenus respectivement avec les équations (3,4,5,6) suivantes :

$$X_{(1)} = 0,54x_{(1)} + 0,46x_{(2)} \quad (3)$$

$$X_{(2)} = 0,25x_{(1)} + 0,50x_{(2)} + 0,25x_{(3)} \quad (4)$$

$$X_{(n-1)} = 0,25x_{(n-2)} + 0,50x_{(n-1)} + 0,25x_{(n)} \quad (5)$$

$$X_{(n)} = 0,54x_{(n)} + 0,46x_{(n-1)} \quad (6)$$

Les indices centrés et réduits des hauteurs pluviométriques annuelles pondérées obtenues sont calculés pour mieux distinguer les périodes de déficit et d'excédent pluviométriques.

Les fluctuations des régimes pluviométriques et hydrologiques matérialisées par les tendances excédentaires et déficitaires sont confortées aux études statistiques de détection de ruptures (BOUKRIM et al., 2011). Ces tests de ruptures permettent d'identifier les années charnières du changement climatique et viennent en appui aux indices pluviométriques et hydrométriques.

D'après H. Lubès et al., (1994), une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un moment donné le plus souvent inconnu. A partir de ces tests, proposés par le logiciel Khronostat (1998) développé par l'IRD (LUBES-NIEL et al., 1998), sera utilisé, dans ce travail, le test de PETTIT.

3.2.2- Relation Pluie/Débit

L'utilisation de la relation Pluie/Débit permettra de déceler les changements dans l'écoulement superficiel qui pourraient être dû aux événements d'origine anthropique telle que la régularisation des débits superficiels par les barrages. la méthode de station témoin est celle utilisé dans ce travail, elle consiste à comparer les données

Comment [D4]: Ne figure pas dans la liste des Réf.bibl

Formatted: Highlight

Formatted: Highlight

Field Code Changed

Formatted: Highlight

Comment [D5]: -Dans l'cette équation (2) remplacer X(t) par x(t)
-Définir suffisamment x(t), x(t-2), x(t-1)....

Field Code Changed

Comment [D6]: même remarque: Remplacer X(1) par x(1).

Comment [D7]: Phrase à reformuler

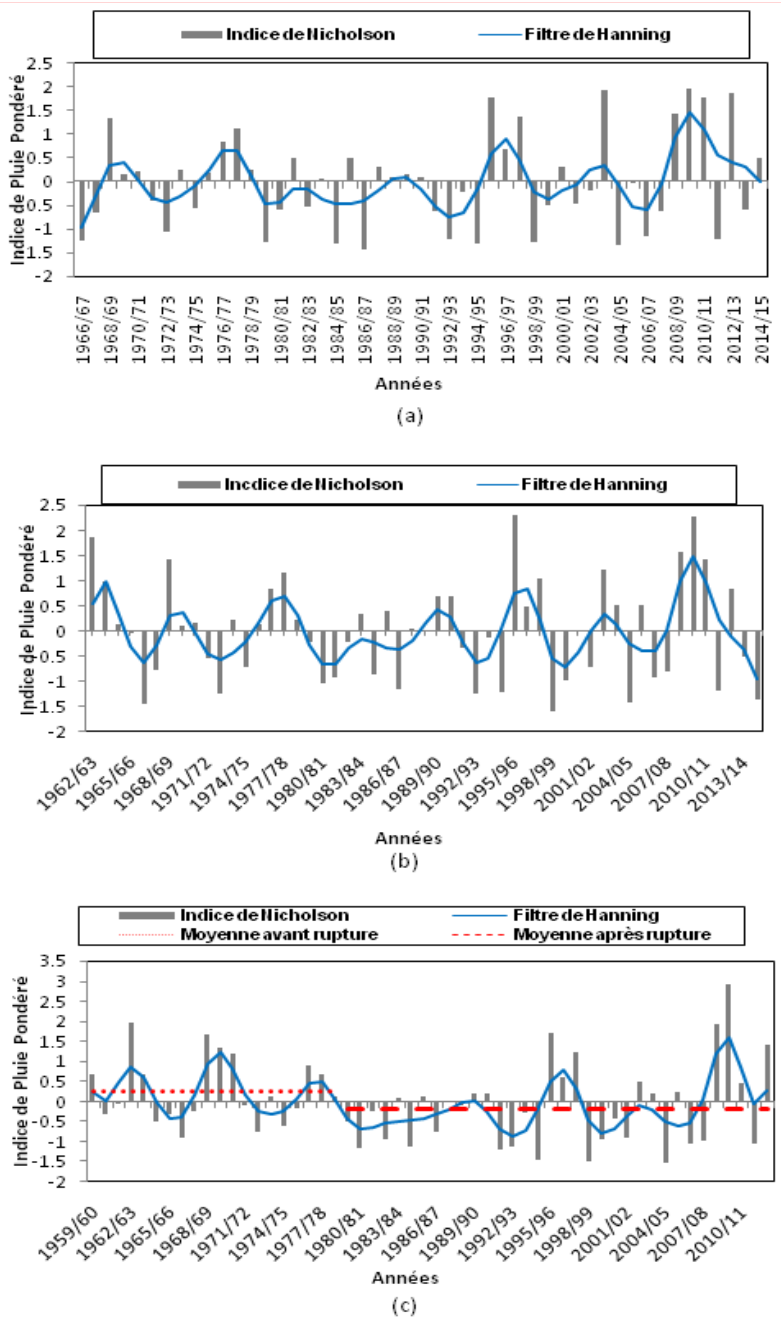
mesurées à la même station avant et après la construction d'un barrage (RICHTER et al., 1997 ; ASSANI et al., 2002).

4- RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1- Variabilité temporelle des précipitations et des débits

4.2.1- Variabilité interannuelle des précipitations

Les variations interannuelles de la pluviométrie aux stations de Mechra Bel Ksiri et Azib Es Soltane sur le Sebou et celle de M'jara sur l'Ouerrha sont caractérisées par une alternance de période humide, de période normale et de période sèche qui sont de durée variable avec des alternances d'années humides et d'années sèches. On remarque que la pluviométrie au niveau des trois stations montre sensiblement une évolution identique avec les mêmes périodes humides et sèches (Figure 2). Toutefois, l'intensité et la durée de ces pluies montrent une différence considérable entre le Sebou et l'Ouerrha. De légères différences apparaissent aussi au niveau de la distribution des périodes sèches et humides. Ainsi, on distingue à Mechra Bel Ksiri entre 1966 et 1979 (Figure 2a) une période normale avec alternance d'années humides et d'années sèches qui ne dépassent pas trois années successives, suivi d'une période extrêmement sèche de 1980 à 1995, puis un retour à une période normale de 1996 à 2015. La pluviométrie à Azib Es Soltane (Figure 2b) montre une alternance d'années humides et d'années sèches sur toute la période de 1962 à 2014 avec une période sèche moins importante qu'à Mechra Bel Ksiri qui dure de 1980 à 1990. Dans l'Ouerrha, à M'jara (Figure 2c), on a également une alternance d'années humides et d'années sèches de 1959 à 1979, puis une période sèche très marquée de 1980 à 1995 suivi d'une reprise de l'alternance -année humides années sèches de 1996 jusqu'à 2013.



Comment [D8]: améliorer la visibilité de la légende, particulièrement (moyenne avant rupture et après rupture en (c))

Figure 2 : Evolution interannuelle de la pluviométrie à Mechra Bel Ksiri (a), Azib Es Soltane (b) et M'jara (c) avec les indices centrés réduits des hauteurs de pluie et les totaux pluviométriques annuels pondérés.

Au niveau des trois stations du bassin, on observe, donc une même tendance avec des intensités différentes, marqué par des indices de Nicholson qui sont deux fois supérieurs sur l'Ouerrha à M'jara que sur le Sebou à Mechra Bel Ksiri et Azib Es Soltane. Ce qui peut être interprétés par le fait que les événements climatiques enregistrés sur l'Ouerrha sont beaucoup plus intenses que sur le Sebou.

Ces résultats comparés à ceux d'autres bassin versants Nord africains montrent une concordance avec ceux de la Tunisie (KINGUMBI et al., 2000) et de l'Algérie (NEZZAL et FTINI-BELAID et al., 2013). En Afrique de l'Ouest et centrale, la sécheresse se situe en général après 1970 (PATUREL et al., 1997 ; SORO et al., 2011) et elle commence dans les pays du Sahel à la fin des années 1960 et début des années 1970 (NIEL et al., 2005).

Formatted: Font: 12 pt

Comment [D9]: Cette référence ne figure pas dans la liste des Réf.biblio

Les tests statistiques effectués sur les séries de pluie pour confirmer les ruptures de stationnarités aux stations de Mechra Bel Ksiri et Azib Es Soltane mettent en évidence le caractère aléatoire dans les séries de pluie, et de ce fait on n'a pas de rupture significative sur l'ensemble des données.

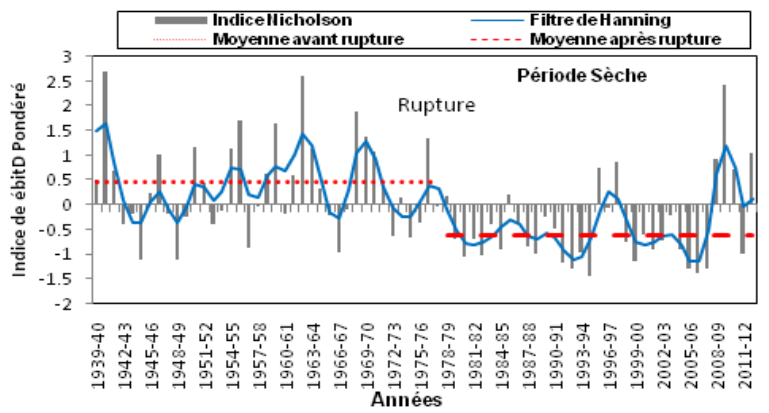
Par contre à M'jara ces tests mettent en évidence le caractère non aléatoire dans la série de pluie. Le test indique que l'hypothèse nulle est rejetée, on accepte l'hypothèse alternative. Il y a présence de rupture dans les données. Cette rupture est observée en 1978 (Figure 2c). Ceci vient confirmer le caractère intense des événements climatiques sur ce sous bassin versant rifain.

4.2.2- Variabilité interannuelle des débits

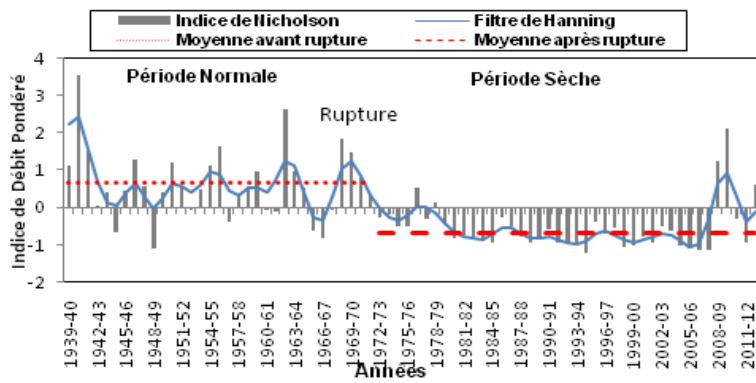
Le Filtre passe bas d'ordre 2 de HANNING appliquées aux séries hydrologiques (Figure 3) montrent une irrégularité interannuelle importante des écoulements dans le bassin du Sebou à Azib Es Soltane et à Mechra Bel Ksiri et sur l'Ouerrha à M'jara.

Sur le Sebou, les graphiques (a) et (b) de la figure 3 montrent respectivement une période normale plus longue (1939 à 1978) à l'aval du bassin au niveau de la station Mechra Bel Ksiri qu'en amont du bassin -à Azib Es Soltane- (1939 à 1972). L'année 1972 correspond à la date de mise en eau du barrage Idriss 1^{er} sur le haut Sebou ; ce qui a contribué à la réduction des apports liquides venant de l'amont du Sebou à la station Mechra Bel Ksiri dont les débits liquides n'ont pas été très influencés du fait de la contribution de l'Ouerrha au cours de cette période. Ce dernier a bien connu une période normale de 1939 à 1978 identique à celle du Sebou à Mechra Bel Ksiri.

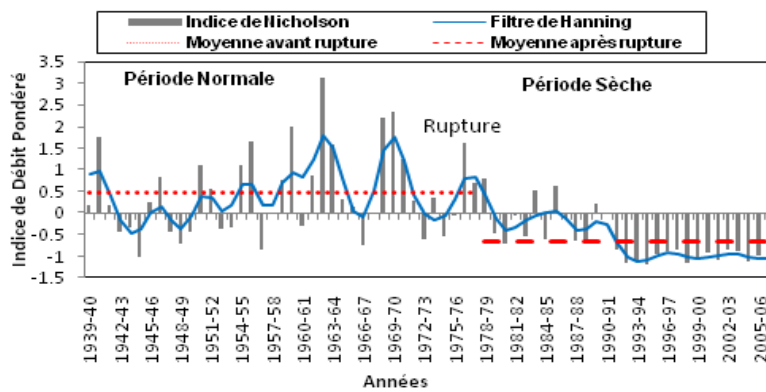
A partir de 1979 et jusqu'à 2008 s'installe, sur le Sebou à Mechra Bel Ksiri et sur l'Ouerrha à M'jara, une longue période sèche alors que ce déficit apparaît déjà en amont du Sebou à Azib Es Soltane dès 1973 après la mise en eau du barrage.



(a)



(b)



(c)

Figure 3-: Evolution interannuelle des débits à Mechra Bel Ksiri (a), Azib Es Soltane (b) et M'jara (c) avec les indices centrés réduits des hauteurs de débit et les totaux de débit annuels pondérés de 1939 à 2007.

Les tests statistiques qui sont effectués sur les séries de débits pour confirmer les ruptures de stationnarités aux stations de Mechra Bel Ksiri, Azib Es Soltane et M'jara mettent en évidence le caractère non aléatoire dans les séries de débits. Les ruptures sont détectées en 1978 à Mechra Bel Ksiri et à M'jara et en 1972 à Azib Es Soltane (Tableau 1). Les moyennes des débits à Mechra bel Ksiri sont de 162 m³/s avant la rupture et 81 m³/s après la rupture correspondant à un déficit de 50%, tandis qu'à Azib Es Soltane elles sont de 80 m³/s avant la rupture et 29 m³/s après la rupture avec un déficit de 63%. A M'jara, sur l'Ouerrha, les moyennes des débits sont de 91 m³/s avant la rupture et 28 m³/s après la rupture avec un déficit de 68%.

Stations	Période <i>D'observation</i> <i>d'observation</i>	Date de rupture	Période normale	Période sèche	Déficit hydrologique
Mechra Bel Ksiri	1939-2013	1978	1939-1978	1979-2008	—50%
AzibEsSoltane	1939-2013	1972	1939-1972	1972-2008	—63%
M'jara	1939-2007	1978	1939-1978	1979-2007	—68%

Formatted: Centered, Indent: Left: -0,1 cm, Right: -0,3 cm, Space After: 0 pt, Line spacing: single

Formatted Table

Formatted: Centered, Indent: Left: -0,1 cm, Right: -0,3 cm, Space After: 0 pt, Line spacing: single

Formatted: Centered, Indent: Left: -0,1 cm, Right: -0,3 cm, Space After: 0 pt, Line spacing: single

Formatted: Centered, Indent: Left: -0,1 cm, Right: -0,3 cm, Space After: 0 pt, Line spacing: single

Tableau 1: Périodes climatiques, ruptures et déficits hydrologique observés sur le Sebou à Mechra Bel Ksiri etAzib Es Soltane et sur l'Ouerrha à M'jara.

5- RELATION DEBIT/PLUIE

L'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau superficielle a été mis en évidence en analysant les relations pluie/débit, afin de déceler la part climatique de la part anthropique. Il est vrai que la variabilité hydrologique découle directement de la variabilité climatique (DAO et al., 2010), mais tout aménagement hydraulique comme la construction des barrages peut perturber cette relation (ASSANI et al., 2002).

Dans le bassin versant du Sebou, la relation pluie/débit (Figure 4) a permis de suivre l'évolution du comportement hydroclimatique du Sebou et de son affluent Ouerrha, mettant ainsi en évidence d'une part les effets de la rupture climatique et d'autre part les effets qui sont probablement liés aux barrages. En effet, les relations pluie/débit obtenues surtout pour l'Ouerrha et pour le Sebou à Azib Es Soltane sont très différentes de celles obtenues sur un bassin versant peu anthropisé comme L'Oubangui (NGUIMALET et ORANGE, 2015).

Formatted: Highlight

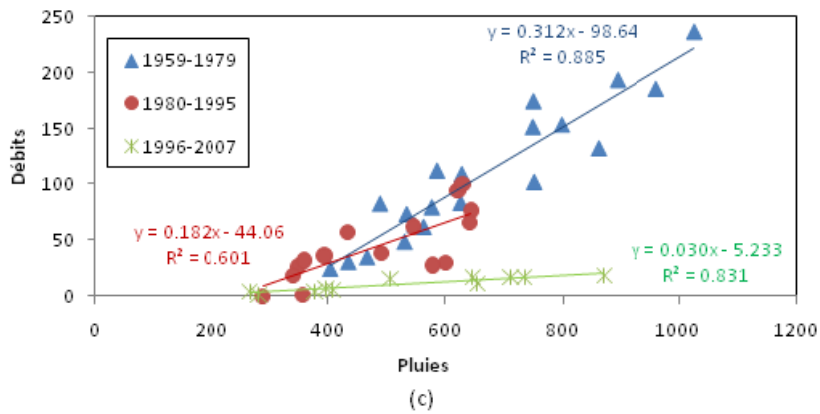
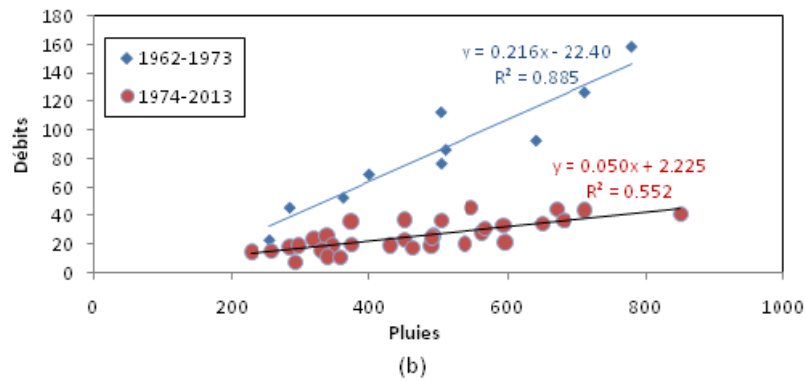
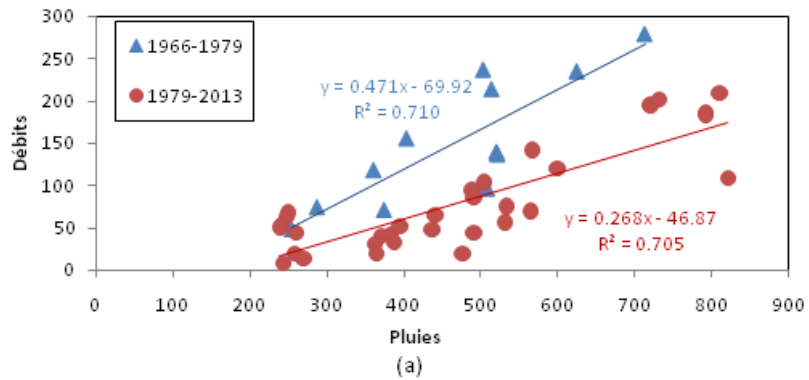


Figure 4 : Relations débits liquides-précipitations mesurés sur le Sebou à la station de Mechra Bel Ksiri (a), Azib Es Soltane (b) et M'jara (c).

Ainsi, ces relations pluie/débit pour le Sebou, aussi bien à Mechra Bel Ksiri (1966 à 1979) qu'à Azib Es Soltane (1966 à 1973), et pour l'Ouerrha (1959 à 1979), montrent de très bon coefficient de corrélation, variant entre $-0,710$ et de $0,886$, mettant en évidence un écoulement étroitement lié à la pluviométrie.

Après 1973, date de mise en eau du barrage Idriss 1^{er} sur le Sebou et jusqu'à 2013, le coefficient de corrélation de la relation pluie/débit diminue ($0,552$) sous l'effet de la régularisation des débits du Sebou par le barrage qui coïncide avec l'épisode de sécheresse absolue qui a affecté ce bassin depuis 1979. A l'aval du bassin, au niveau de Mechra Bel Ksiri, la forte contribution de l'Ouerrha a pu soutenir les apports liquides du Sebou et légèrement masquer les effets de régularisation des eaux et maintenir la même corrélation entre les pluies et les débits ($0,705$). Sur l'Ouerrha, de 1980 et jusqu'à 1995, années consécutives très sèches, le coefficient de corrélation pluie/débit diminue légèrement ($0,601$) confirmant ainsi, la rupture déjà observée à l'aide des tests statistiques effectués sur les séries de pluies et de débits aux différentes stations.

Après 1996, le barrage Al Wahda a été mis en service sur l'Ouerrha, le coefficient de corrélation pluies/débit s'améliore ($0,831$) du fait du maintien d'un écoulement régulier, indépendamment des pluies à l'aval, par les lâchers de barrages.

6- REGIME HYDROLOGIQUE

A l'aval du Sebou (Mechra Bel Ksiri) après l'année 1978, ~~correspondant~~, correspondant à la date de rupture climatique, les apports liquides qui atteignaient, auparavant $5,11 \text{ Mm}^3$ ont subi une réduction d'environ 50%, ne dépassant pas, ainsi, $2,56 \text{ Mm}^3$.

Sur le haut Sebou (Azib Es Soltane), on remarque qu'après 1973, correspondant à la date de rupture, le bilan hydrique est déficitaire d'environ -60 à 70%.

Sur l'Ouerrha, ~~L'apport l'apport~~ liquide, qui était de $2,93 \text{ Mm}^3$ avant 1979, montre au cours de la période de sécheresse (de 1979 à 1995) une réduction de l'ordre de 40%, passant ainsi à $1,73 \text{ Mm}^3$. Ce déficit s'accroît après la construction du barrage Al Wahda, et atteint les 90% et l'apport liquide n'atteint plus que $0,35 \text{ Mm}^3$.

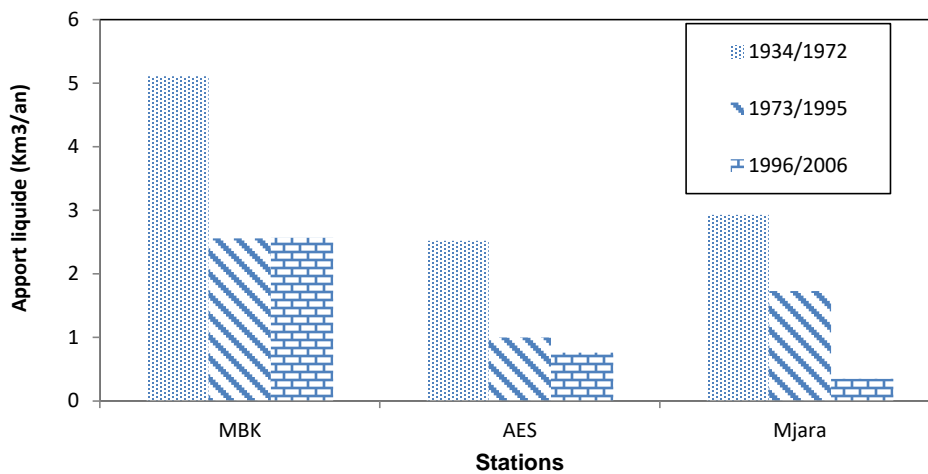


Figure 5 : Apports liquides moyens interannuels enregistrés sur le Sebou à Mechra Bel Ksiri (MBK) et à Azib Es Soltan (AES) et sur l'Ouerrha à M'jara.

7- CONCLUSION

L'étude de la variabilité climatique, au cours des 60 dernières années, montre que le bassin versant du Sebou a connu des périodes pluviométriques excédentaires et déficitaires qui ont eu des répercussions importantes sur l'écoulement de surface. Des méthodes statistiques ont été utilisées sur les séries de mesures de précipitations et de débits annuels, telles que l'indice de NICHOLSON et le filtre Passe Bas de HANNING d'ordre 2 afin de mettre en évidence les fluctuations des régimes pluviométriques et hydrologiques. Ces derniers ont permis de déterminer les différentes périodes hydroclimatiques humides ou sèches pour les pluies et excédentaires ou déficitaires pour l'écoulement. Les tests statistiques de rupture ont révélé des changements dans le régime pluviométrique et hydrologique dans ce bassin versant. Ces ruptures ont permis de mettre en évidence une différence considérable dans l'intensité, la durée et la variabilité des pluies entre le haut Sebou Moyen Atlasique à caractère nival et l'Ouerrha situé dans le Rif, zone la plus pluvieuse du bassin. Sur les séries de débits annuels, des ruptures sont détectées dans le bassin, soit en rapport avec le changement naturel du régime d'écoulement (1978), soit en rapport avec la régularisation de l'écoulement des cours d'eau à la suite de la construction des barrages (1973). L'analyse des relations pluie/débit ~~associés~~ associée aux tests statistiques de détection de rupture a permis de différencier l'impact climatique de l'impact anthropique lié aux effets des barrages. Les ruptures sont bien visibles à travers la relation pluie/débit qui diffère entre la période avant la construction des barrages (1939-1973) et la période après la construction des barrages et aussi à travers la réduction des apports liquides qui engendre des déficits hydrologiques variant entre 40 et 90% respectivement sur le Sebou et sur l'Ouerrha.

Les résultats de cette étude constituent une importante base de données pour l'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques et les effets importants sur les régimes hydrologiques des cours d'eau aménagés en zone semi-aride. Dans ce contexte, l'amélioration et le renforcement des systèmes d'observations des pluies et des débits au niveau des différentes stations s'avèrent nécessaires afin de mieux caractériser l'évolution du climat et contribuer à une meilleure adaptation aux probables effets néfastes des changements climatiques sur les écoulements de surface.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de coopération scientifique interuniversitaire (PCSI) ROFA entre l'université Ibn Tofail, l'INPT Toulouse, l'Université de Cocody et le Centre d'Océanographie d'Abidjan en Côte d'Ivoire et l'Université de Dakar au Sénégal. Nous exprimons aussi notre gratitude aux responsables de l'Agence ~~Du-du~~ Bassin Hydraulique ~~Du-du~~ Sebou, qui ont mis à notre disposition des données climatiques et hydrologiques des différentes stations.

Références Bibliographiques

ABHS (2011) : Etude d'actualisation de plan directeur d'aménagement intégré des ressources en Eau du Bassin Hydraulique de Sebou, Rapport PDAIRE.

ASSANI A.A., BUFFIN-BELANGER T., ROY A.G., 2002. Analyse des impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada) Rev. Sci. Eau. 15, 557-257.

BENN P.C., ERSKINE W.D., 1994. Complex channel response to flow regulation: Cudgegond River below windamere Dam, Australia Appl. Geogr. 14, 153-168.

BOUAICHA R., BENABDELFADEL A., 2010. Variabilité et gestion des eaux de surface au Maroc. Sécheresse vol. 21, n° 4, octobre-novembre-décembre 2010.

BOUKRIM S., SADKAOUI N., LAHRACH A., CHAOUNI A., 2011. Etude d'impact des changements sur les ressources hydriques de bassin versant de l'Ouergha (Rif-Maroc) Revue scientifique et Technique, LJEE N°19. Décembre 2011.

Comment [D10]: Cette référence manque dans le texte. A y insérer ou supprimer.

CERVATTI J.L., CHRAIBI A., MERBOUL M. et STERENBERG J. (1990). Les travaux d'exécution de l'aménagement d'Aït Youb (Maroc). Mem. Soc. Geol. France, N.S., n°157, 163-172.

DAO A., KAMAGATE B., MARIKO A., GOULA B.T.A., SEGUIS L., MAIGA H.B., SAVANE I., 2010. Variabilité ~~Climatique-climatique~~ et réponse ~~Hydrologique hydrologique~~ de bassin versant transfrontalier de Kolondiéba au Sud du Mali. European Journal of scientific Reseach, ISSN 1450-216 X Vol.43 n°4 (2010), p435-444.

Comment [D11]: Cette référence manque dans le texte. A y insérer ou supprimer.

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE). Références incomplètes

Comment [D12]: Compléter cette référence ou supprimer

Formatted: Highlight

Formatted: Highlight

HAIDA S., AIT FORA A., PROBST J.-L., SNOUSSI M., 1999. Hydrologie et fluctuations hydroclimatiques dans le bassin versant de Sebou entre 1940 et 1994. Sècheresse 1999 ; 10n (3) 221-6.

Comment [D13]: Cette référence manque dans le texte. A y insérer ou supprimer.

HAIDA S., 2000. Thèse : Transports de matières et bilan de l'érosion mécanique et de l'altération chimique sur un bassin versant de zone semi-aride : Le Sebou. Impact des variations climatiques et des activités humaines.

Comment [D14]: Respecter et harmoniser l'insertion des références bibliographiques en adéquation avec la forme exigée par le journal

HUBERT P., SERVAT E., PATUREL J.-E., KOUAME B., BENDJOUDI H., CARBONNEL J.P., LUBES-NIEL H., La procédure de segmentation, dix ans après, IAHS Publ. n° 252, 1998.

Comment [D15]: Cette référence manque dans le texte. A y insérer ou supprimer.

JOUILIL I., BITAR K., SALAMA H., AMRAOUI, MOKSSIT A., TAHIRI M., 2013. Sécheresse météorologique au bassinhydraulique Oum er Rbia durant les dernières décennies. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 12, Janvier 2013, pp. 109-127.

KINGUMBI A., BERGAOUI Z., BOURGE J., HUBERT P., Kallel R., 2000. Etude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie central. References incomplètes

KOUASSI A.M, KOUAME K.F, KOFFI Y.B, DJE K.B, PATUREL J.E, OULARE S., 2010. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest. European Journal of Geography references incompletes (Vol, N°, pp.?)

LE BARBE L., LEBEL T., 1997. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990. Journal of Hydrology, Volumes 188–189, February 1997, Pages 43–73.

Field Code Changed

Field Code Changed

LEBEL T., DIEDHIOU A., LAURENT H., 2003. *Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales*, Volume 108, Issue D8, 27 April 2003.

Field Code Changed

LUBES H., MASSON J.M., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., BOYER J.F., 1994. *Caractérisation des fluctuations dans les séries chronologiques par application des tests statistiques. Etude bibliographique. Programme ICCARE, Rapport no.3, ORSTOM, Montpellier, France.*

LUBES-NIEL H., MASSON J.M., PATUREL J.E ET SERVAT E., 1998. *Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 11, n° 3, 1998, p. 383-408.*

MAHE G., OLIVRY J-C., 1995. *Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Central de 1951 à 1989. Sécheresse n°1, Vol. 6, mars 95.*

Comment [D16]: Cette référence manque dans le texte. A y insérer ou supprimer.

NEZZAL F., IFTINI-BELAID Z., 2013. *Variabilité climatique et impacts anthropiques sur la nappe alluviale de la Mitidja Orientale (Baie d'Alger). Revue scientifique et technique, LJEE N°21 et 22. Spécial colloque CIREDD'2013.*

NGUIMALET C-R et D. ORANGE (2015), *caractérisation de la baisse hydrologique de la rivière Oubangui a Bangui, République Centrafricaine. Colloque International sur l'Hydrologie des Grands bassins fluviaux de l'Afrique 26-30 Octobre 2015, Hammamet, Tunisie.*

NICHOLSON S.E., KIM J., HOOPINGARNER J., 1988. *Atlas of African rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology, Florida State University Tallahassee, Florida, USA.*

NORRANT C., 2007. *Variabilité climatique passée, changement climatique futur : Que peut-on réellement observer ? Air Pur N° 72 - Deuxième semestre 2007.*

Formatted: Highlight

PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAME B., LUBES-NIEL H., Fritsch J.M., Masson, J.M., 1997. *Manifestation d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. IASH 240, 21-30.*

PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAMÉ B., LUBÈS-NIEL H., OUEDRAOGO M., MASSON J.M., 1997, "Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part two: an integrated regional approach", *Journal de l'Hydrologie*, vol. 191, 16-36.

RICHTER B.D., BAUMGARTNER J.V., BRAUN D.P., 1997. How much water does a river need ? *Freshwater Biology*. 37, 231-249.

Formatted: Highlight

SORO T.D., SORO N., OGA Y.M.-S., LASM T., SORO G., AHOUSI K.E., BIEMI J., 2011. La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire), *Physio-Géo*, V.5, 2011 P55-P73.

TARDY Y., PROBST J.-L., 1992. Sécheresse, crises climatiques et oscillations téléconnectées du climat depuis cent ans, *Sécheresse n°1*, Vol 3, mars 92.

Comment [D17]: Cette référence manque dans le texte. A y insérer ou supprimer.

TRAMBLAY Y., BADI W., DRIOUECH F., EL ADLOUNI S., NEPPEL L., SERVAT E., 2012. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco, *Global and Planetary change* 82-83 (2012) 104-114.

YAO A.B., GOULA B.T.A., KOUADIO Z.A., KOUAKOU K.E., KANE A. ET SAMBOU S., 2012. Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide : cas du bassin versant de la Lobo au centre-ouest de la côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 19 (2012) 136 – 157.