

## LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DE LA CRISE HYDRIQUE DE 2013-2014 DANS LA REGION METROPOLITAINE DE SAO PAULO, BRESIL

MIRANDA G. M.<sup>1</sup>, REYNARD E.<sup>1</sup>, MILANO M.<sup>1</sup>, GUERRIN J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lausanne, Institut de géographie et durabilité, Bâtiment Géopolis, CH-1015 Lausanne, Suisse, graziele.munizmiranda@unil.ch, emmanuel.reynard@unil.ch, marianne.milano@unil.ch, joana.guerrin@unil.ch

**Résumé** – La région métropolitaine de São Paulo a vécu une situation de crise hydrique aiguë durant les années 2013 et 2014, qui s'est traduite par des interruptions d'approvisionnement en eau potable de certaines villes et industries. Dans la littérature, cette crise est souvent attribuée à une diminution exceptionnelle des précipitations couplée à des températures élevées. Après avoir caractérisé le climat régional, cette étude analyse l'évolution à long terme (1944-2015) de la pluviométrie et des débits du Piracicaba, l'un des bassins versants alimentant en eau la métropole. La pluviométrie, les températures et les débits de la période 2013-2015 sont ensuite confrontés aux normes climatologiques et hydrologiques et à l'évolution à long terme du climat et de l'hydrologie. On conclut que la période 2013-2015 a certes été relativement sèche, mais qu'elle n'est pas exceptionnelle à l'échelle des 70 dernières années. Les causes de la crise hydrique de 2013-2014 doivent donc être cherchées ailleurs que dans la seule situation climatique.

**Mots-clés** : stress hydrique, crise hydrique, normes climatologiques, São Paulo, Brésil

**Abstract** – *Climatological characteristics of the 2013-2014 water crisis in São Paulo Metropolis, Brazil.* São Paulo metropolitan region experienced an acute water crisis in the years 2013 and 2014, which resulted in interruptions of drinking water supply for some cities and industries. In the literature, this crisis is generally attributed to an exceptional decrease in rainfall coupled with high temperatures. After characterizing the regional climate, this study analyses the long-term evolution (1944-2015) of rainfall and flow rates in the Piracicaba River, one of the basins that supply water to the metropolis. Rainfall, temperatures and flow rates of the 2013-2015 period are then confronted to the climatic and hydrological norms, and the long-term evolution of climate and hydrology. The main conclusion is that the 2013-2015 period has indeed been relatively dry, but is not unique according to the past 70 years. The origin of the 2013-2014 water crisis is not only related to the climatic situation, other factors must be addressed.

**Keywords**: water stress, water crisis, climatological norms, São Paulo, Brazil

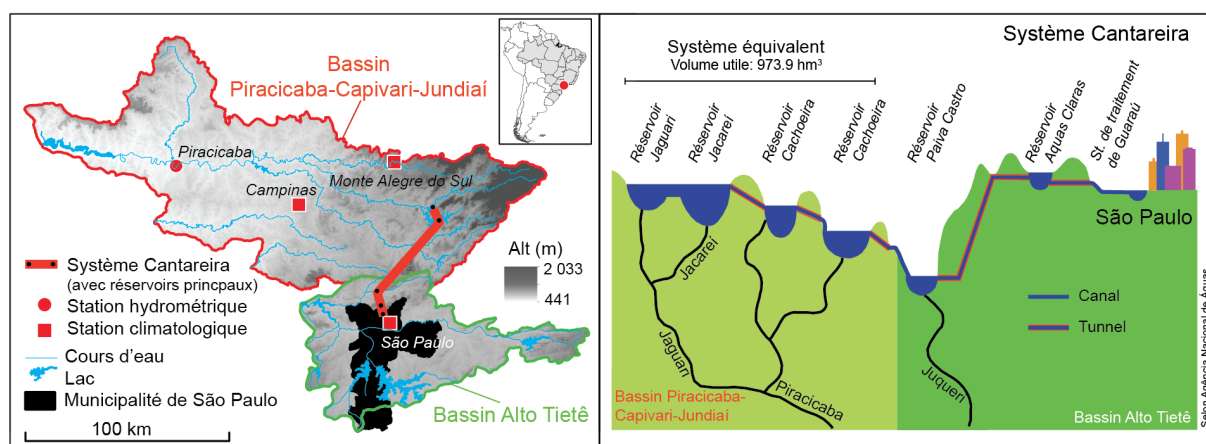
### Introduction

Plusieurs municipalités de la région métropolitaine de São Paulo ont vécu une crise hydrique sans précédent durant les années 2013 et 2014 (Agência Nacional de Águas, 2014 ; Jacobi et al., 2015). Cette crise s'est traduite par des difficultés d'approvisionnement en eau potable dans plusieurs villes et l'interruption de l'activité de certaines industries dans la plus importante région économique du pays. Le principal système d'approvisionnement en eau de la métropole est le système Cantareira, qui permet le transfert de 31 m<sup>3</sup>/s d'eau depuis la région métropolitaine de Campinas, dans les bassins versants Piracicaba, Capivari et Jundiaí (PCJ), vers la région métropolitaine de São Paulo (Fig. 1). Durant les années 2013 et 2014, les volumes d'eau stockés dans les réservoirs ont fortement diminué et le « volume mort » (c'est-à-dire l'eau stockée en dessous des cotes de prélèvement et donc en principe non mobilisable) a dû être utilisé pour l'approvisionnement en eau. Selon la presse brésilienne et internationale, la principale cause de cette crise est à chercher dans le manque exceptionnel de précipitations et l'augmentation des températures, ce qui aurait provoqué une diminution considérable du volume stocké dans le système Cantareira. Cette étude vise ainsi à préciser les caractéristiques climatiques de la crise hydrique.

## 1. Zone d'étude et méthodes

La région métropolitaine de São Paulo compte 20 millions d'habitants et se situe dans le bassin versant Alto-Tietê (Fig. 1), considéré comme l'un des plus problématiques du pays à cause de l'urbanisation intense et de la détérioration de la qualité des rivières (Agência Nacional de Águas, 2014). Afin de pallier aux difficultés d'approvisionnement en eau dans les années 1960, un système de transfert interbassins, le système Cantareira (Fig. 1), a été développé à partir de 1966 et mis en eau pour la première fois en 1976. Il s'agit de l'un des plus grands systèmes de transfert d'eau au monde, formé de six réservoirs – Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha, Paiva Castro et Águas Claras – couvrant une superficie de 22 579.5 km<sup>2</sup> sur le territoire de 12 municipalités, à cheval sur les états de Minas Gerais et de São Paulo. Les quatre premiers réservoirs – situés dans le bassin PCJ, dans la métropole de Campinas – forment un ensemble unique appelé Système équivalent, dont le volume utile maximal est de l'ordre de 973,9 hm<sup>3</sup> (Consórcio PCJ, 2013 ; Agência Nacional de Águas, 2014). Des galeries transfèrent les eaux du bassin PCJ vers la rivière Juqueri, dans le bassin Alto Tietê. Elles sont ensuite stockées dans le réservoir Paiva Castro, puis pompées dans le réservoir Águas Claras, à partir duquel elles sont traitées pour permettre d'approvisionner 45% de la population de la région métropolitaine de São Paulo, soit 8.8 millions d'habitants (Artigo 19 Brasil, 2014). Le système est géré par la société de l'eau et de l'assainissement de l'Etat de São Paulo (SABESP) qui alimente en eau et traite les eaux usées de plus de la moitié des 645 municipalités de l'Etat de São Paulo.

Nous avons mené trois types d'analyses : (1) une caractérisation du climat et de l'hydrologie des bassins étudiés ; (2) une étude de l'évolution sur plusieurs décennies des paramètres climatiques et hydrologiques ; (3) une analyse plus ciblée de la situation des années 2013–2015. Les données climatiques (précipitations, températures) et hydrologiques (débits) proviennent respectivement de l'Institut national de météorologie (Instituto Nacional de Meteorologia – INMET) et du Département des eaux et de l'énergie électrique de l'Etat de São Paulo (Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo – DAEE). Les données des stations suivantes (Fig. 1) ont été exploitées : des données de température et de précipitations de la station de São Paulo (Mir. de Santana ; BZ-83781) pour la période 1961–2015 (avec une lacune en 1983) ; des données pluviométriques de la station de Monte Alegre do Sul (D3-027) pour la période 1943–2015 ; des chroniques de débits de la station hydrométrique de Piracicaba (4D-007) pour la période 1944–2015. Nous avons également utilisé les données des stations météorologiques de Campinas (BZ-83729) et São Paulo - Horto Florestal (BZ-83856) pour la période 1961–1990, à titre de comparaison.

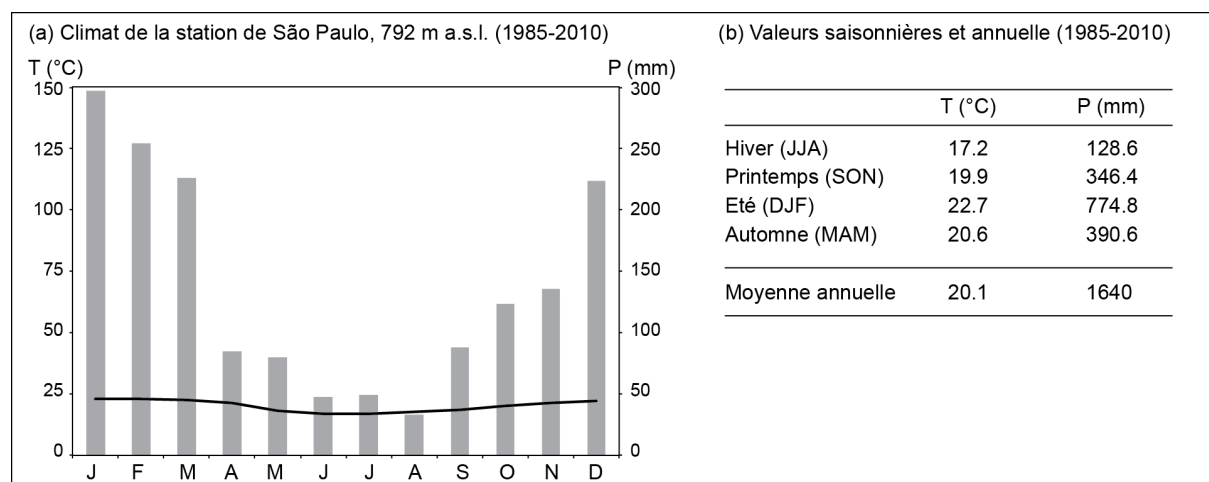


**Figure 1.** A gauche : situation des bassins versants étudiés, de la région métropolitaine de São Paulo et du Système Cantareira ; à droite : coupe simplifiée du Système Cantareira.

## 2. Résultats

### 2.1 Caractérisation climatique

Le climat régional est caractérisé à partir des données de la station climatologique de São Paulo (Mir. de Santana) sur la période 1985–2010 (Fig. 2). Cette période de 26 ans a été choisie car les données de l'année 1984 sont incomplètes et afin de se calquer au mieux sur la norme climatologique internationale (1981–2010). Cette période permet également de ne pas empiéter sur les trois années concernées par la crise hydrique. L'Etat de São Paulo jouit d'un climat tempéré avec des variations géographiques allant d'un climat humide à été très chaud (type Cfa selon la classification de Köppen-Geiger ; Peel et al., 2007), humide à été chaud (Cfb) et à un climat à hiver sec et été très chaud (Cwa). A São Paulo, les températures moyennes sont régulières et les normes saisonnières oscillent entre 17.2°C en hiver et 22.7°C en été, pour une moyenne annuelle de 20.1°C (Fig. 2a). Les précipitations annuelles moyennes sont relativement abondantes et s'élèvent à 1640 mm, avec une saison sèche en hiver et une saison humide en été (Fig. 2b). Les mois de décembre à mars sont les plus arrosés, le mois de janvier cumulant à lui seul près de 300 mm, alors que les mois d'avril à septembre sont les plus secs, avec un minimum de précipitations en août (32.5 mm en moyenne pour la période ; Fig. 2). La période 1961–1990 a été un peu plus sèche (moyenne annuelle des précipitations : 1441 mm) et un peu plus fraîche (température moyenne annuelle : 19.2°C). Toujours pour la période 1961–1990, les normes de la station de São Paulo (Horto Florestal) présentent des valeurs moyennes annuelles de 18.5°C pour les températures et de 1591 mm pour les précipitations.



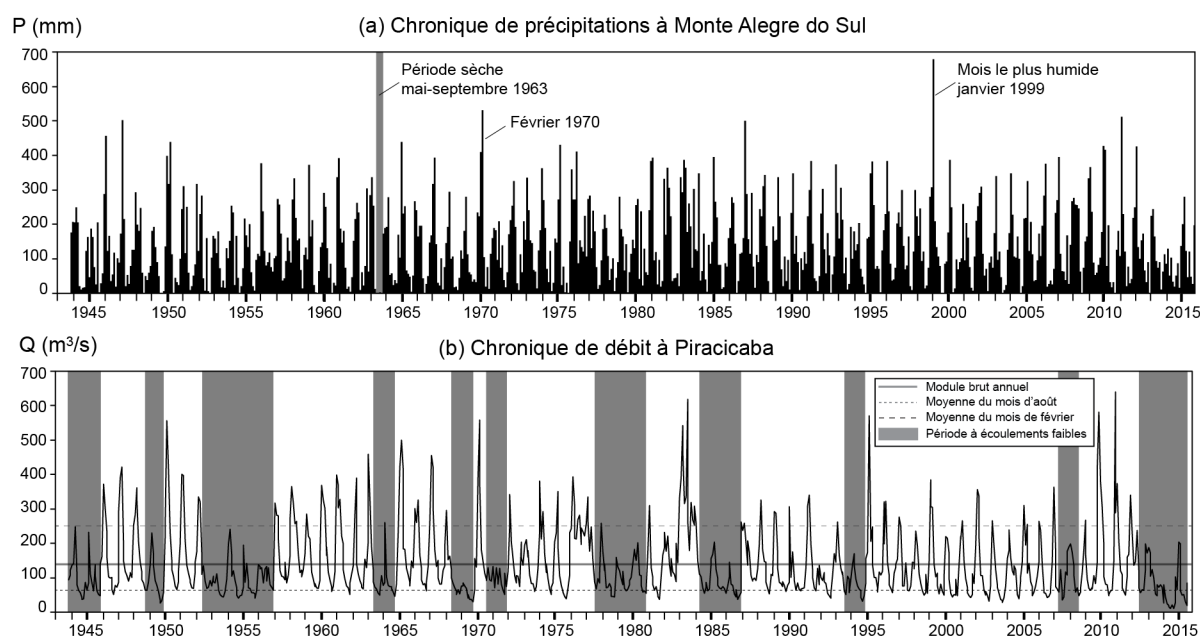
**Figure 2.** a) Climogramme de la station de São Paulo (Mir. de Santana) pour la période 1985–2010 ; b) Valeurs saisonnières et annuelles de température et précipitations de la station de São Paulo (Mir. de Santana) pour la période 1985–2010 (Source des données : Instituto Nacional de Meteorologia – INMET).

Le climat des bassins PCJ est assez proche de celui régnant à São Paulo. Les valeurs de températures et précipitations annuelles moyennes pour la période 1961–1990 sont de 20.7°C et de 1358 mm, respectivement, à la station de Campinas (altitude : 678 m), de 18.9°C et de 1447 mm à la station de Monte Alegre do Sul (altitude : 771 m). A cette dernière station, les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à 1664 mm durant la période 1981–1990. Cela permet de conclure que tant dans le bassin PCJ que dans celui du Alto Tietê, la pluviométrie a été plus élevée (de l'ordre de 200 mm par an) durant la période 1981–2010 que durant la période 1961–1990. La crise hydrique des années 2013–2014 semble donc avoir été précédée d'une période relativement humide pendant trois décennies.

## 2.2 Evolution de la pluviométrie et des débits depuis 1944

Sur la base de chroniques pluviométriques de la station de Monte Alegre do Sul et de chroniques de débit de la rivière Piracicaba à Piracicaba (Fig. 1), nous étudions l'évolution de la pluviométrie et des débits mensuels entre octobre 1943 et septembre 2015 (Fig. 3). Aucune tendance à long terme ne se dégage. Une droite de régression linéaire a été calculée pour les deux chroniques. Les coefficients de corrélation ne sont que de 0.002 et 0.007, respectivement. La stationnarité des chroniques observées a été testée en appliquant une série de tests statistiques : tests de Pettitt (1979), Lee & Heghinian (1977) et Buishand (1984) ainsi que la segmentation de Hubert et al. (1989). Ces tests recherchent une rupture dans les chroniques en testant une hypothèse de stationnarité. Pour les précipitations, ils ont mis en évidence les mois de janvier 1999 et février 1970, mois très humides qui ont totalisé 678 mm et 532 mm, respectivement, soit 245 % et 253 % des précipitations moyennes des mois de janvier et février pour la période considérée.

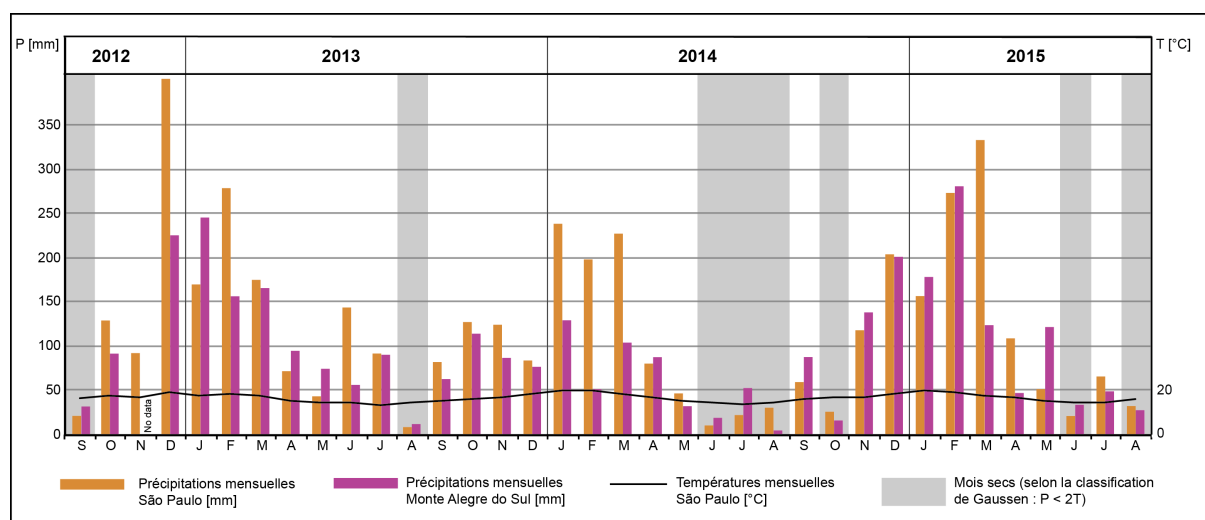
Le module brut du Piracicaba pour la période 1944–2015 est de 138 m<sup>3</sup>/s. Le mois d'août présente les débits mensuels moyens les plus bas (68 m<sup>3</sup>/s), alors que les débits mensuels moyens les plus élevés ont lieu en février (253 m<sup>3</sup>/s ; Fig. 3). Les différents tests statistiques ont mis en évidence les années hydrologiques (octobre à septembre) 1983 et 2010, des années aux écoulements particulièrement élevés avec des débits annuels moyens de 342 m<sup>3</sup>/s et 205 m<sup>3</sup>/s, soit 2.5 et 0.5 fois supérieurs au module de la période. Par ailleurs, les périodes présentant des écoulements faibles – durant lesquelles les débits moyens hivernaux sont inférieurs au débit moyen du mois d'août pour la période et sont suivis de mois estivaux dont les débits mensuels moyens sont inférieurs à la moyenne du mois de février pour la période – ont été identifiées (en grisé sur la figure 3). Avec un module de 79 m<sup>3</sup>/s, la période 2013–2015 est l'une de ces périodes mais ce n'est pas la seule. Le milieu des années 1950 en particulier semble avoir été marqué par des écoulements relativement faibles (92 m<sup>3</sup>/s), tout comme les périodes 1977–1980 (105 m<sup>3</sup>/s) et 1984–1986 (87 m<sup>3</sup>/s).



**Figure 3.** a) Chronique des précipitations mensuelles à Monte Alegre do Sul (Source des données : Instituto Nacional de Meteorologia – INMET) ; b) Chronique des débits à Piracicaba (Source des données : Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo – DAEE).

### 2.3 Les caractéristiques climatiques de la période 2013-2015

Afin de préciser les contours climatiques de la crise hydrique de 2013–2014, une étude plus approfondie de la période comprise entre septembre 2012 et août 2015 a été entreprise. Globalement, Monte Alegre do Sul, située dans le bassin PCJ, reçoit moins de précipitations que São Paulo (80% sur la période considérée ; Fig. 4), sauf pendant la phase de crise la plus aiguë (juin-août 2014) où c'est São Paulo qui présente les conditions les plus sèches. Par ailleurs, en comparaison avec la période 1985–2010, le climat sur l'ensemble des trois années n'est pas particulièrement sec, avec des précipitations à hauteur de 88 % de la norme annuelle à São Paulo (Tabl. 1). La période de sécheresse débute en avril 2013 et se prolonge jusqu'en octobre 2014 (1241 et 1702 mm à Monte Alegre do Sul et São Paulo). Les précipitations hivernales (mai-oct. 2014) ne représentent que 49%/45% par rapport à la normale à Monte Alegre do Sul/São Paulo, tandis qu'au cours de la période précédente (sept. 2013-avril 2014), les précipitations représentent 49%/80% de la normale. Le cœur de la sécheresse s'étend de juin à août 2014, avec respectivement 65% et 47% des précipitations normales.



**Figure 4.** Précipitations et températures mensuelles d'octobre 2012 à septembre 2015 (Source des données : Instituto Nacional de Meteorologia – INMET).

**Tableau 1.** Valeurs de précipitations pour les stations de São Paulo et de Monte Alegre do Sul et comparaison avec les normes saisonnières et annuelles de la période 1985-2010 (Source des données : Instituto Nacional de Meteorologia – INMET). \* Lacune de données en novembre 2012.

Période	Monte Alegre do Sul	São Paulo	Monte Alegre do Sul	São Paulo
	[mm]	[mm]	[% par rapport à 1985-2010]	
Sept. 2012 – août 2015 (moyenne)	–*	1441	–*	87.9
Sept. 2012 – août 2013	–*	1618	–*	98.6
Sept. 2013 – août 2014	814	1263	50.0	77.0
Sept. 2014 – août 2015	1298	1442	79.8	87.9
Avril 2013 – octobre 2014	1241	1702	–	–
Septembre 2013 – avril 2014	707	1157	49.3	80.3
Mai – octobre 2014	210	191	49.2	45.3
Juin – août 2014	74	61	65.5	47.2

### Conclusion

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette brève analyse. Tout d'abord, si elle est remise dans un contexte temporel large (70 ans), la crise hydrique de 2013–2014 ne peut pas être qualifiée d'exceptionnelle du point de vue climatique. Aucune tendance vers un assèchement du climat n'a pu être détectée dans les séries à disposition et l'utilisation de tests

statistiques n'a pas permis de déceler de rupture dans les chroniques qui pourrait mettre en évidence une situation de précipitations anormalement faibles. En outre, une réduction forte et prolongée des débits du Piracicaba a déjà pu être observée par le passé, notamment au milieu des années 1950 et 1980. Sur le court terme (septembre 2012 à août 2015), les données pluviométriques à disposition montrent par contre que São Paulo n'a reçu que 88% des précipitations moyennes de la période 1985–2010 et que la station de Monte Alegre do Sul a reçu environ 20% de précipitations en moins que São Paulo. Le déficit a même été de l'ordre de 49% à Monte Alegre do Sul durant l'été 2013-2014 (septembre-avril). Or, c'est normalement au cours de cette période que les réservoirs du système Cantareira se rechargent en eau. Par ailleurs, les trois mois d'hiver 2014 (JJA) ont été particulièrement secs, surtout à São Paulo qui a reçu 47% des valeurs normales de précipitations. C'est donc la conjonction d'un été 2013–2014 plus sec que la normale dans le bassin PCJ n'ayant pas permis une recharge des réservoirs du système Cantareira et d'un hiver 2014 déficitaire en pluie qui semble être à l'origine climatique de la crise hydrique de 2013–2014 dans l'agglomération de São Paulo. Il n'en demeure pas moins que de telles situations hydro-climatiques ont déjà eu lieu par le passé, notamment au milieu des années 1950, sans provoquer une telle crise. Certains auteurs considèrent que la crise a également été due à un manque d'efficacité et de transparence de la gestion de l'eau (Tuffani, 2014 ; Artigo 19 Brasil, 2014 ; Jacobi et al., 2015 ; Zonta & Adame, 2015). Cela nous amène donc à supposer que le climat n'est pas la seule raison de la crise hydrique de 2013–2014 et que des causes anthropiques doivent aussi être recherchées. C'est l'objectif d'un projet lancé par l'Institut de géographie et durabilité de l'Université de Lausanne, en collaboration avec le Centre d'études sur les métropoles (CEM) de São Paulo.

## Bibliographie

- Agência Nacional de Aguas, 2014. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – Encarte especial sobre a crise hídrica*. Brasília, Agência Nacional de Aguas, Ministério do Meio Ambiente, 31 p.
- Artigo 19 Brasil, 2014. *Sistema Cantareira e a crise da água em São Paulo: a falta de transparência no acesso à informação*. São Paulo : Department for International Development [En ligne]. Disponible sur : <http://artigo19.org/> (consulté le 26.01.2016).
- Buishand T., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrol.*, **58**, 11–27.
- Consórcio PCJ, 2013. *Sistema Cantareira: um mar de desafios* [En ligne]. Disponible sur : [http://agua.org.br/apresentacoes/71557\\_ApostilaCantareira-ConsorcioPCJ.pdf](http://agua.org.br/apresentacoes/71557_ApostilaCantareira-ConsorcioPCJ.pdf) (consulté le 26.01.2016).
- Hubert P., Carbonnel J., Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydro et météorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.*, **110**, 349–367.
- Jacobi P. R., Cibim J., Leão R. S., 2015. Crise na macrometrópole paulista e respostas da sociedade civil. *Estudos avançados*, **29**, 27-42.
- Lee A., Heghinian, S., 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables - A Bayesian approach. *Technometrics*, **19**(4), 503–506.
- Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **11**, 1633-1644
- Pettitt A. N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Stat.* **28**, 126–135.
- Tuffani, M., 2014. *Um alerta de 1977 para a crise da água* [Article de journal en version électronique]. Disponible sur: <http://mauriciotuffani.blogfolha.uol.com.br/2014/11/13/um-alerta-de-1977-para-a-crise-da-agua/> (consulté le 26.01.2016).
- Zonta Y. S., Adame A. I., 2015. *A crise hídrica – por que está faltando água em parte do Brasil ?*. Disponible sur : <http://site.ajes.edu.br/seminario/arquivos/20150715013325.pdf> (consulté le 26.01.2016).