



Impacts du changement climatique sur les pluies intenses et les crues en Méditerranée

Yves Trambly ^a, Aurélien Ribes^b, Samuel Somot ^b, Luc Neppel^a, Philippe Lucas-Picher ^b, Freddy Vinet^c and Eric Sauquet ^d

^aHSM (Univ. Montpellier, CNRS, IRD), Montpellier, France ; ^bCNRM (Université de Toulouse, Météo-France, CNRS), Toulouse, France ;

^cLAGAM (Univ. Paul Valéry Montpellier 3), Montpellier, France ; ^dINRAE, UR RiverLy, Centre de Lyon-Villeurbanne, France

RESUME

Les crues ont des impacts socio-économiques importants tout particulièrement dans les régions méditerranéennes et il existe une forte interrogation quant à une éventuelle augmentation de leur intensité due au changement climatique. Sur le pourtour Méditerranéen, il est désormais établi que les précipitations extrêmes pourraient augmenter dans les scénarios climatiques futurs, suivant la tendance déjà amorcée dans les données observées. Néanmoins, les tendances observées dans le Sud de la France indiquent une baisse de la fréquence des crues dans la majorité des bassins, malgré l'augmentation des précipitations intenses à l'origine de ces épisodes, du fait de la baisse de l'humidité des sols qui peut fortement moduler la réponse hydrologique des bassins. A l'inverse, une tendance à l'augmentation de l'intensité des crues les plus extrêmes est observée dans certains bassins. Il est en effet impératif de différencier le comportement des différents types de bassins, urbains, naturels ou agricoles, à différentes échelles, face aux modifications du régime des pluies intenses. Si de nombreux travaux ont été effectués pour estimer les conditions climatiques futures, on ne connaît pas bien les modifications possibles des variables hydrologiques et des états de surface, avec des interactions complexes entre précipitations et processus d'infiltration sur les versants, qui peuvent fortement moduler la magnitude des crues. Il est donc nécessaire de mieux comprendre et quantifier la réponse hydrologique des cours d'eau face à ces changements climatiques et anthropiques.

MOTS-CLES

Crues ; Méditerranée ; pluies intenses ; changement climatique

KEYWORDS

Floods; Mediterranean; extreme rainfall; climate change

Climate change impacts on extreme precipitation and floods in the Mediterranean

ABSTRACT

Floods have significant socio-economic impacts, particularly in the Mediterranean regions, and there is strong questioning about a possible increase in their intensity due to climate change. In the Mediterranean, it is now established that extreme precipitation could increase in future climate scenarios, following the trend already started in the observed data. Nevertheless, the trends observed in the South of France indicate a decrease in the frequency of floods in the majority of the basins, despite the increase in intense precipitation causing these episodes, due to the decrease in soil moisture which can strongly modulate the hydrological response of the basins. Conversely, a trend towards an increase in the intensity of the most extreme floods is observed in some basins. It is indeed imperative to differentiate the behavior of different types of basins, urban, natural or agricultural, at different scales, in the face of changes in the regime of extreme rainfall. Although a lot of work has been done to estimate future climatic conditions, we are not well aware of the possible modifications of hydrological variables and surface conditions, with complex interactions between precipitation and infiltration processes on hillslopes, which can strongly modulate the magnitude of floods. It is therefore necessary to better understand and quantify the hydrological response in a context of climatic and anthropogenic changes.

Introduction

Les crues éclair affectent régulièrement les régions Méditerranéennes surtout pendant l'automne. Llasat et al. (2013) indiquent une augmentation du nombre de crues provoquant des dommages entre 1981 et 2010 dans le sud de la France et le nord de l'Espagne, qu'ils attribuent à une vulnérabilité accrue et à des changements d'utilisation des terres. Les régions méditerranéennes

françaises concentrent 66% du coût total des dommages causés par les inondations aux propriétés privées en France (Vinet, 2011) et le total des actifs perdus en raison des inondations augmente comme dans de nombreuses autres régions (Paprotny et al., 2018). Une question importante est de savoir si cette augmentation est reliée à un changement d'intensité de l'aléa ou bien une vulnérabilité croissante des territoires à ces épisodes. A l'heure actuelle, il existe des différences systématiques

CONTACT Yves Trambly  yves.trambly@ird.fr

entre les projections sur l'évolution du risque d'inondation en Europe du Sud (Italie, Grèce, France, Péninsule ibérique) dans la plupart des études (Kundzewicz et al., 2016). En effet, certaines études indiquent une augmentation dans le sud de l'Europe (Alfieri et al., 2017) tandis que d'autres suggèrent une diminution (Thober et al., 2018). Ces différences sont probablement dues à l'utilisation de modèles et scénarios climatiques différents mais aussi causées par l'utilisation de modèles hydrologiques à grande échelle généralement calibrés et validés sur un nombre limité de grands bassins. Or ce type de modèle hydrologique global (LISFLOOD, VIC, HYPE ...) n'est généralement pas adapté aux petits bassins fluviaux de moins de 500 km², soit la taille de bassin versant typique de la région méditerranéenne qui peut générer des crues dévastatrices (Merheb et al., 2016). L'objectif de cette contribution est de faire le bilan des connaissances sur l'évolution des pluies extrêmes et des crues dans les régions Méditerranéennes françaises.

Changements observés et simulés sur les pluies extrêmes

Les épisodes de fortes précipitations observés dans les régions méditerranéennes comptent parmi les phénomènes météorologiques les plus extrêmes en France métropolitaine avec des cumuls sur 24 h qui dépassent fréquemment les 100 mm. Plusieurs travaux ont étudié l'évolution de ces épisodes de pluies intenses dans le Sud de la France et tendent à montrer une augmentation de leur intensité en particulier depuis la décennie 1980 (Blanchet et al., 2018 ; Soubeyroux et al., 2015). L'étude la plus complète à ce jour est celle de Ribes et al. (2019) portant sur près de 700 stations sur la période 1958–2015. Les résultats indiquent une intensification significative des précipitations extrêmes (Figure 1), estimée à +22 % entre 1961 et 2015, mais avec une fourchette

d'incertitude assez large, entre +7 % et +39 % (Ribes et al., 2019). Cette fourchette d'incertitude traduit la difficulté à quantifier précisément le changement climatique dans les séries observées, du fait de la variabilité naturelle du climat, particulièrement forte pour les événements de fortes précipitations. L'intensification observée est cohérente, bien que plutôt supérieure, avec celle simulée par les modèles de climat (i.e. de l'ordre de quelques % par degré de réchauffement). L'étude d'autres indicateurs tels que le nombre d'événements, leur superficie, ou le volume d'eau précipitée au-delà d'un seuil, conduisent aux mêmes conclusions quant à l'évolution récente de ces événements. En complément de ce travail basé sur les observations, Luu et al. (2018) ont montré à l'aide d'un ensemble de modèles climatiques régionaux que ces changements d'intensité des pluies intenses étaient également détectables dans les modèles de climat et pouvaient être attribués à l'augmentation des températures dans la région.

Pour les scénarios futurs, la plupart des études convergent vers une augmentation probable des pluies extrêmes (Rajczak et Schär, 2017). A l'échelle des bassins versants Méditerranéens, Trambly et Somot (2018) ont montré grâce à un ensemble de modèles de climat régionaux une augmentation des pluies intenses dans les bassins du Sud de la France, avec une bonne convergence entre les modèles. L'ordre de grandeur des changements projetés des précipitations extrêmes à la fin du XXI^e siècle, est en moyenne de l'ordre de +10% mais est très variable selon les modèles de climat et les bassins. Ces tendances sont détectées avant l'an 2000 dans la plupart des cas, conformément aux études basées sur les observations dans cette même région. Tous ces travaux ont été menés sur les précipitations extrêmes au pas de temps journalier (total sur 24 h), or il est probable que la hausse des températures induise

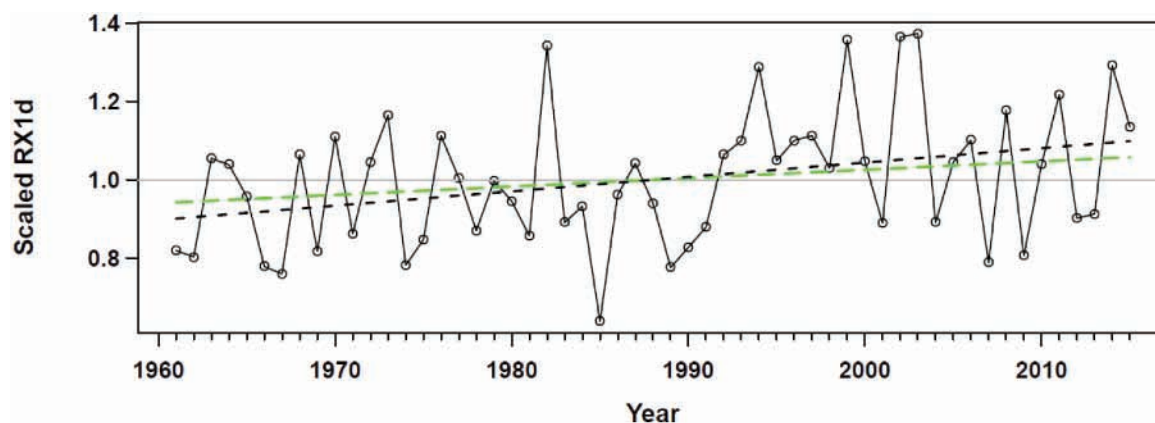


Figure 1. Série temporelle de l'indicateur régional de l'intensité des épisodes de fortes précipitations, sur la période 1961–2015 sur le pourtour Méditerranéen. L'indicateur est construit à partir des maximums annuels renormalisés, et est donc sans unité (la valeur 1 correspond à l'intensité moyenne). *Pointillés noirs* : tendance linéaire estimée sur cet indicateur. *Pointillés verts* : tendance linéaire attendue en suivant la relation de Clausius-Clapeyron (+6,8 %/K, soit +11,8 % sur la période compte tenu du réchauffement observé de +1.7K). D'après Ribes et al. (2019).

également des changements importants à des pas de temps infra-journaliers sur les épisodes convectifs. L'étude de ces changements sur l'intensité des précipitations, la durée des épisodes pluvieux intenses et leur étendue spatiale nécessite des bases de données spatialisées sur les pluies à des pas de temps fins, horaires ou moins, ainsi que des modèles de climat à haute résolution spatiale et temporelle, comme les modèles régionaux de climat permettant de représenter de manière explicite la convection (Prein et al., 2015 ; Coppola et al., 2018).

Changements observés sur les crues

Une étude récente a montré que malgré l'augmentation des événements de précipitations extrêmes, on ne retrouve pas de hausse généralisée des épisodes de crues dans le sud de la France (Tramblay et al., 2019). Cette étude, qui se base sur 170 bassins versants situés en zone de climat Méditerranéen, visait à détecter d'éventuelles tendances sur l'occurrence et l'intensité des crues, et attribuer ces changements à différents facteurs, comme les précipitations extrêmes, l'humidité des sols ou l'occupation des terres. Les résultats ont montré que pour quelques bassins seulement, l'intensité des crues montre une tendance à la hausse reliée à l'augmentation des pluies intenses. A l'inverse, une tendance globale à une diminution du nombre de crues annuelles est observée (Figure 2). Ce résultat conforte des analyses similaires menées sur un ensemble de stations en France (Giuntoli et al., 2012) mais aussi en Europe (Blöschl et al., 2019), qui montrent une tendance à la baisse de l'intensité des crues dans les régions Méditerranéennes. La diminution de l'humidité du sol semble être un moteur important de ces changements, en effet dans tous les bassins une augmentation de la température et de l'évapotranspiration

associée à une diminution des précipitations conduit à une réduction de l'humidité du sol ces dernières décennies (Tramblay et al., 2019). En analysant les tendances sur les conditions initiales d'humidité des sols précédant un épisode de crue, pour différents seuils au-delà des 80^{ème}, 95^{ème} et 99^{ème} centiles, on observe dans un grand nombre de bassins une baisse de ces conditions initiales de saturation. En particulier dans la plupart des bassins où l'on retrouve également une tendance à la baisse des crues (Figure 3). Ces tendances à la diminution de l'humidité des sols sont d'autant plus marquées pour les épisodes de crue de faible magnitude et donc d'occurrence plus fréquente.

Ce travail suggère que la diminution de l'humidité du sol peut compenser l'augmentation des précipitations extrêmes et ainsi entraîner des crues moins fréquentes. Ces changements sont principalement observés pour les grands bassins agricoles, avec une faible urbanisation ou encore dans les zones karstiques. Une conclusion importante est que pour les mêmes facteurs climatiques à grande échelle (en termes de température, d'évapotranspiration et de précipitations), les tendances sur les crues peuvent être différentes selon les bassins, modulées par la topographie, les types de sols et leur occupation. Il importe aussi de noter que des changements dans l'intensité des précipitations se répercutent de manière très différente selon les échelles spatiales, avec une plus forte sensibilité des petits bassins et des zones qui favorisent le ruissellement de surface comme les périmètres urbanisés.

Conclusions

Les études récentes montrent une augmentation de l'intensité et de l'occurrence des précipitations

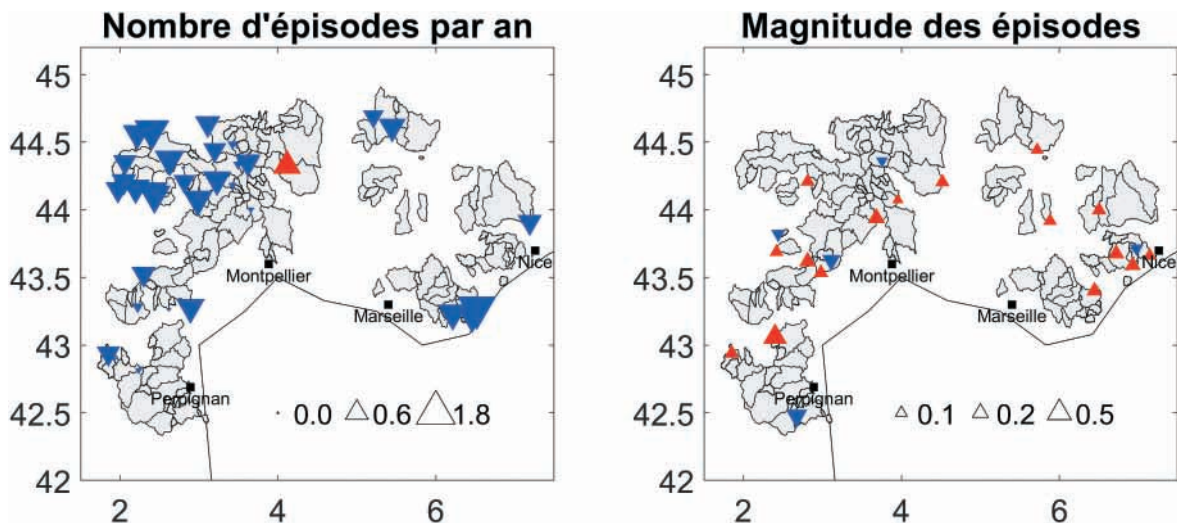


Figure 2. Tendances observées sur l'occurrence annuelle des débits de crue (gauche) et leur magnitude (droite), en prenant pour seuil le 99^{ème} centile des débits journaliers. Les triangles bleus indiquent une tendance significative à la baisse, les triangles rouges une tendance à la hausse, suivant le test de Mann-Kendall au seuil de significativité de 10%. D'après Tramblay et al. (2019).

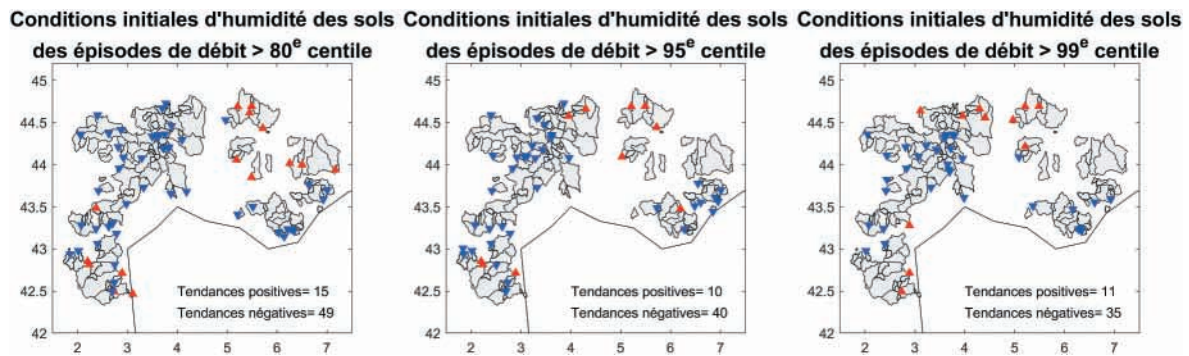


Figure 3. Tendances observées sur les conditions initiales d'humidité des sols, pour des épisodes de débits supérieurs au 80^{ème}, 95^{ème} et 99^{ème} centiles. Les triangles bleus indiquent une tendance significative à la baisse, les triangles rouges une tendance à la hausse, suivant le test de Mann-Kendall au seuil de significativité de 10%. D'après Trambly et al. (2019).

intenses, qui ne se traduit pas par une hausse généralisée des crues. Pour certains bassins méditerranéens, l'augmentation des fortes précipitations associée à un nombre réduit de jours de pluie et une évapotranspiration plus intense pourrait diminuer la teneur en eau du sol, réduisant ainsi le ruissellement. En revanche, des pluies plus intenses dans des zones urbanisées et imperméables, ou encore sur des sols nus soumis à des phénomènes de battance, pourraient augmenter le ruissellement de surface et donc l'ampleur des inondations. Il est donc nécessaire d'utiliser des modèles hydrologiques ou de surface qui sont capables de représenter ces processus. Par ailleurs, si beaucoup d'études ont été réalisées pour estimer les conditions climatiques futures, les changements des conditions de surface qui peuvent fortement moduler la génération des crues, ne sont pas bien documentés à l'échelle régionale. Des études à des échelles plus fines s'avèrent donc nécessaires, notamment pour les plus petits bassins soumis aux crues torrentielles.

Enfin, cette absence de tendance à la hausse des crues doit être mise en perspective avec l'augmentation observée de la vulnérabilité à ces épisodes. Les zones proches de la Méditerranée ont connu une augmentation de la population et une extension des zones urbanisées, entraînées en partie par l'augmentation des activités touristiques (Vinet, 2011). L'analyse des tendances sur l'aléa naturel doit être croisée avec l'exposition (par exemple, la population dans les zones sujettes aux inondations) et les données de vulnérabilité (par exemple, le vieillissement de la population à l'avenir ou les caractéristiques des bâtiments) pour anticiper l'évolution des dommages en relation avec les crues soudaines dans le bassin méditerranéen (Ruin et al., 2008 ; Boudou et al., 2016). Pour ceci, il est nécessaire de développer des bases de données sur la vulnérabilité et l'exposition à analyser en lien avec les données hydrométéorologiques (Vinet et al., 2019).

ORCID

Yves Trambly  <http://orcid.org/0000-0003-0481-5330>
 Samuel Somot  <http://orcid.org/0000-0002-5066-2921>
 Philippe Lucas-Picher  <http://orcid.org/0000-0001-8707-7745>
 Eric Sauquet  <http://orcid.org/0000-0001-9539-7730>

Références

- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., & Salamon, P. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5(2), 171–182. <https://doi.org/10.1002/2016EF000485>
- Blanchet, J., Molinié, G., & Touati, J. (2018). Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Climate Dynamics*, 51(3), 799–812. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3122-7>
- Blöschl, G. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Boudou, M., Lang, M., Vinet, F., & Cœur, D. (2016). Comparative hazard analysis of processes leading to remarkable flash floods (France, 1930–1999). *Journal of Hydrology*, 541, 533–552. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.032>
- Coppola, E., Sobolowski, S., Pichelli, E., Raffaele, F., Ahrens, B., & Anders, I. (2018). A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8>
- Giuntoli, I., Renard, B., & Lang, M. (2012). Floods in France. In Z. W. Kundzewicz (Ed.), *Changes in flood risk in Europe*, IAHS Wallingford, UK, IAHS Special Publ., 10, 212–224.
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., & Hattermann, F. F. (2016). Differences in flood hazard projections in Europe – their causes and consequences for decision making. *Hydrological Sciences Journal*, 2626667, 1241398. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1241398>
- Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Petrucci, O., Pasqua, A. A., Rosselló, J., Vinet, F., & Boissier, L. (2013). Towards a database on societal impact of Mediterranean floods within the framework of the HYMEX project. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(5), 1337–1350. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1337-2013>

- Luu, L. N., Vautard, R., Yiou, P., van Oldenborgh, G. J., & Lenderink, G. (2018). Attribution of extreme rainfall events in the South of France using EURO-CORDEX Simulations. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2018GL077807>
- Merheb, M., Moussa, R., Abdallah, C., Colin, F., Perrin, C., & Baghdadi, N. (2016). Hydrological response characteristics of Mediterranean catchments at different time scales: a meta-analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 61(14), 2520–2539. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1140174>
- Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O., & Jonkman, S. N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature Communications*, 9(1), 1985. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04253-1>
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., & Goergen, K. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 323–361. <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>
- Rajczak, J. & Schär, C. (2017). Projections of future precipitation extremes over Europe: A multimodel assessment of climate simulations: Projections of precipitation extremes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20), 10,773–10,800. <https://doi.org/10.1002/2017JD027176>
- Ribes, A., Thao, S., Vautard, R., Dubuisson, B., Somot, S., & Colin, J. (2019). Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate Dynamics*, 52(1–2), 1095–1114. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2>
- Ruin, I., Creutin, J.-D., Anquetin, S., & Lutoff, C. (2008). Human exposure to flash floods – Relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France. *Journal of Hydrology*, 361(1–2), 199–213. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.044>
- Soubeyroux, J.-M., Neppel, L., Veysseire, J.-M., Tramblay, Y., Carreau, J., & Gouget, V. (2015). Evolution des précipitations extrêmes en France en contexte de changement climatique. *La Houille Blanche*, 1, 27–33. <https://doi.org/10.1051/lhb/2015004>
- Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Marx, A., Pan, M., & Rakovec, O. (2018). Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2, and 3 degrees global warming. *Environmental Research Letters*, 13(1), 014003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9e35>
- Tramblay, Y. & Somot, S. (2018). Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean. *Climatic Change*, 151(2), 289–302. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2300-5>
- Tramblay, Y., Mimeau, L., Neppel, L., Vinet, F., & Sauquet, E. (2019). Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), 4419–4431. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4419-2019>
- Vinet, F., Bigot, P., Papagiannaki, L., & Kotroni (2019). Mapping flood-related mortality in the Mediterranean Basin. Results from the MEFV v2.0 DB. *Water*, 11(10), 2196. <https://doi.org/10.3390/w11102196>
- Vinet, F. (2011). *Flood risk assessment and management in France. The case of Mediterranean Basins*. Flood Prevention and Remediation (WIT Press).