

## Invitation à la soutenance de thèse

**TÉLÉDÉTECTION DES INONDATIONS PLUVIALES À L'AIDE D'IMAGERIE SATELLITE ET  
D'APPRENTISSAGE STATISTIQUE POUR L'ÉVALUATION DE MODÈLES DE SUSCEPTIBILITÉ  
AU RUISSELLEMENT INTENSE PLUVIAL**

**PLUVIAL FLOOD DETECTION USING SATELLITE REMOTE SENSING AND MACHINE LEARNING  
TECHNIQUES FOR THE EVALUATION OF SURFACE RUNOFF SUSCEPTIBILITY MAPPING**

Arnaud Cerbelaud

**Le 13 juin 2023 à 09h**  
ISAE- 10 Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse  
Salle des thèses

### Devant le jury composé de :

Mme Laurence MOY	LETG UMR	Rapporteuse
M. Andreas ZISCHG	University of Bern	Rapporteur
Mme Dominique COURAULT	UMR EMMAH INRAE	Examinatrice
M. Hervé YESOU	Université de Strasbourg	Examineur
M. Xavier BRIOTTET	Onera	Directeur de thèse
Mme Laure ROUPIOZ	Onera	Membre invité
M. Pascal BREIL	INRAE	Membre invité

### Résumé

Les inondations pluviales se produisent généralement lors d'épisodes pluvieux de courte durée et de forte intensité et se caractérisent par un écoulement extrême d'eau de pluie causant divers types de dommages à la surface terrestre. Comparativement aux inondations fluviales (c'est-à-dire lorsque les rivières débordent), les inondations pluviales ont été estimées responsables d'environ la moitié de toutes les réclamations pour dommages causés par les inondations chaque année. Un ruissellement de surface intense peut potentiellement se produire n'importe où, en particulier à l'extérieur du voisinage des cours d'eau, et sur des périodes de temps très courtes. Par conséquent, les données d'observation associées aux inondations pluviales sont très difficiles à obtenir et la plupart des sources ne peuvent être considérées comme exhaustives. Cette thèse vise à tirer le meilleur parti de la disponibilité croissante de l'imagerie satellitaire à haute résolution pour identifier les empreintes des inondations pluviales sur le sol dans les jours qui suivent un événement météorologique violent, et non les surfaces d'eau inondées en tant que telles.

Dans un premier temps, un géoréférencement étendu et une labellisation des zones touchées par des ruissellements intenses ont été réalisés sur trois événements distincts du Sud de la France. Ensuite, les produits optiques open-source Sentinel-2 (S-2) ont été considérés pour leur résolution spatiale fine, leur fréquence de revisite mondiale élevée et leur bonne plage spectrale. Des images de changement ont été produites sur chaque événement à partir des données pré et post-événement sans nuage les plus proches afin de déterminer des modèles statistiques spécifiques dans l'évolution temporelle des indices spectraux basés sur la végétation / l'eau dans les zones touchées. Les travaux initiaux ont identifié des combinaisons optimales d'indicateurs S-2 pour implémenter avec succès un classificateur de processus gaussien basé sur des objets transférables appelé SPCD, pour Sentinel Plot-based Change Detection. Des taux de détection supérieurs ou égaux à 70 % et des faux positifs inférieurs à 12 % ont été obtenus sur les trois événements en utilisant de simples indices spectraux basés sur le VNIR comme le NDVI ou le NDWI. Ensuite, les cartes d'impact résultantes de SPCD ont été utilisées pour évaluer en profondeur la méthode de cartographie de la susceptibilité IRIP© en tenant compte des mesures radar de l'intensité des précipitations des événements. Le modèle IRIP s'est avéré très pertinent car les proportions de parcelles endommagées augmentaient en conséquence avec des niveaux de sensibilité plus élevés, et encore plus lorsque l'on se concentrait sur les endroits où les précipitations étaient les plus fortes. Des améliorations structurelles à IRIP ont également été suggérées dans une version appelée IRIP++. Les principaux prédicteurs de l'IRIP pour localiser les dommages dus au ruissellement se sont avérés être l'indice d'humidité topographique en association avec la susceptibilité de production du ruissellement en amont. Par la suite, une deuxième méthode généralisable appelée FuSVIPR, pour *Fusion of Sentinel-2 and Very high resolution Imagery for Pluvial Runoff*, a été développée. Il a enrichi les images de changement S-2 avec des images optiques post-événement à très haute résolution spatiale provenant de satellites Pléiades ou de capteurs aéroportés pour identifier plus précisément et au niveau du pixel les changements d'occupation du sol induits par les inondations pluviales, à l'aide d'algorithmes Random Forest ou U-net. Des cartes d'impact submétriques ont finalement été obtenues sur les trois sites de validation contrastés, affichant une bonne précision (taux de détection  $\geq 75\%$ ) et moins de faux positifs ( $\leq 2\%$ ) par rapport à SPCD. Un événement de validation récent supplémentaire en Afrique du Sud avec des vérités terrain externes a confirmé la précision et la transférabilité de la méthode dans une zone suburbaine avec des performances de classification similaires (77%). Ensuite, IRIP ainsi que sa version améliorée suggérée IRIP++ ont été démontrés pertinents, cette fois sur la base des cartes d'impact FuSVIPR. En parallèle, une méthodologie originale a été développée pour soutenir la réduction d'échelle des précipitations extrêmes à l'aide d'un simulateur stochastique afin de produire des scénarios à échelle fine cohérents avec la distribution spatiale des dommages causés par les inondations pluviales telle qu'identifiée dans les cartes FuSVIPR.

Pluvial floods occur typically during short-term high-intensity rainfall events and are characterized by extreme overland flow of rainwater causing various types of damages to the land surface. Comparably to fluvial floods (i.e. when rivers overflow), pluvial floods have been estimated accountable for around half of all flood damage claims each year. Intense surface runoff can potentially occur anywhere, especially outside the vicinity of watercourses, and over very short time periods. Consequently, observational data associated with pluvial floods are very hard to come by and most sources cannot be considered exhaustive. This thesis aims at making the most of the growing availability of high-resolution satellite imagery to identify pluvial flood footprints on the ground in the days following a heavy weather event, not flooded water surfaces *per se*.

To start with, extended geo-referencing and labeling of areas affected by intense overland flow was carried out on three distinct events in the South of France. Then, open-source Sentinel-2 (S-2)

optical products were considered for their fine spatial resolution, high worldwide revisit frequency and good spectral range. Change images were produced on each event from the closest cloud-free pre and post event data to determine specific statistical patterns in the temporal evolution of vegetation-/water-based spectral indices within affected areas. Initial works identified optimal combinations of S-2 indicators to successfully implement a transferable object-based Gaussian process classifier called SPCD, for *Sentinel Plot-based Change Detection*. Detection rates greater or equal than 70% and false positives lower than 12% were obtained on all three events using simple VNIR-based spectral indices like the NDVI or NDWI. Then, the resulting impact maps from SPCD were used to thoroughly evaluate the IRIP© susceptibility mapping method by considering rainfall intensity radar measurements of the events. The IRIP model was found very relevant as the proportions of damaged plots increased accordingly with higher susceptibility levels, and even more so when focusing on where precipitations were the heaviest. Structural improvements to IRIP were also suggested in a version called IRIP++. The main IRIP predictors for locating runoff damages turned out to be the topographic wetness index in association with the uphill runoff production susceptibility. Afterwards, a second generalizable method called FuSVIPR, for *Fusion of Sentinel-2 and Very high resolution Imagery for Pluvial Runoff*, was developed. It enriched the S-2 change images with post event very high spatial resolution optical imagery from Pléiades satellites or airborne sensors to identify land cover changes induced by pluvial floods more precisely and at the pixel level, using Random Forest or U-net algorithms. Submetric impact maps were eventually obtained on the three contrasted validation sites, displaying good accuracy ( $\geq 75\%$  detection rates) and fewer false positives ( $\leq 2\%$ ) compared to SPCD. An additional recent validation event in South Africa with external ground truths confirmed the accuracy and transferability of the method in a suburban area with similar classification performances (77%). Then, IRIP as well as its suggested enhanced version IRIP++ were further demonstrated relevant, this time based on the FuSVIPR impact maps. In parallel, an original methodology was developed to support the downscaling of extreme rainfall using a stochastic simulator in order to produce fine-scale scenarios that are consistent with the spatial distribution of pluvial flood damages as identified in the FuSVIPR maps.

### Mots clés

Inondation pluviale, cartographie de susceptibilité, télédétection, détection de changement, apprentissage automatique, analyse des précipitations.