

La modélisation du ruissellement pluvial : Aléa CCR à 25 mètres de résolution

Thomas ONFROY¹, David MONCOULON¹

¹ Caisse Centrale de Réassurance – 157 boulevard Hausmann – tonfroy@ccr.fr, dmoncoulon@ccr.fr

La modélisation des inondations est au cœur des activités R&D de CCR depuis plus dix ans. Cette expérience a démontré qu'une part significative des sinistres consécutifs inondations n'était pas uniquement due aux débordements se produisant dans le lit majeur des cours d'eau mais à imputer au ruissellement pluvial. CCR dispose d'un modèle d'estimation des impacts économiques, mis à jour régulièrement et utilisé pour estimer les dommages aux biens assurés lors de la survenance d'inondations en France. Ce modèle opérationnel est calibré sur une sélection d'événements historiques survenus en France depuis 1999. Pour la simulation des événements déterministes, les données de précipitation et d'évapotranspiration sont acquises depuis la Publithèque de Météo-France. Pour la modélisation probabiliste, les événements sont tirés d'un catalogue d'un millier d'événements fictifs répartis sur 400 années de précipitations du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. D'un point de vue hydrologique, le modèle de ruissellement simule les écoulements des eaux de surface en tout point du territoire lorsque l'intensité des précipitations dépasse l'infiltration et la capacité de rétention en eau des sols, en prenant en compte les différents modes d'occupation du sol. Cela est effectué dans tous les bassins versants hydrologiques et pour tous les cours d'eau non jaugés. Les écoulements simulés en surface sont distribués sur les pentes d'un Modèle Numérique de Terrain à 25 mètres de résolution. Le modèle d'aléa inondation, incluant également la modélisation du débordement et des hauteurs d'eau au sein du lit majeur des principaux cours d'eau, permet d'effectuer une estimation du coût des événements et de mesurer l'exposition de l'État, de CCR et des sociétés d'assurance au risque d'inondation. Enfin, le modèle est utilisé dans le cadre d'études portant sur l'impact du changement climatique, à l'exemple de l'étude réalisée en partenariat avec Météo-France en 2018 pour la France métropolitaine et sur les Antilles et la Réunion en 2019. Des travaux restent à mener pour modéliser les inondations dues à la saturation du réseau pluvial et aux remontées des réseaux d'assainissements se produisant lors d'intempéries intenses notamment dans les secteurs les plus imperméabilisés.

Mots-clefs : ruissellement ; modélisation ; précipitations ; événements ;

Rain runoff modelling: CCR hazard at 25 meters resolution

Flood modelling is at the heart of CCR R&D activities since more than ten years. The CCR experience has demonstrated that a significant share of flood claims are not only due to overflowing in the rivers floodplains but had to be allocated to rain-induced runoff. CCR masters a model to estimate economic impacts, regularly updated and used to estimate flood damage for events occurring in France. This operational model is calibrated on historical flood events that occurred in France since 1999. For the deterministic events simulation, the precipitations and evapotranspiration data are acquired on Météo-France's Publithèque platform. For the probabilistic modelling, the hazard outputs are gathered from a thousand fictive rainfall events catalog. Those events are disseminated on 400 years of precipitations of the Météo-France ARPEGE-Climat model. From a hydrological point of view, the runoff model allows to simulate surface water flows at any point of the territory where the precipitations intensity exceeds the infiltration and the water retention capacity of the soils, taking into account the different land cover types. This process is done for all the hydrological sub watersheds, where the simulated water surface flows are distributed on the slopes of a 25 meters Digital Terrain Model, for all the ungauged rivers. The flood hazard model, that include as well overflowing and water levels modelling on the major rivers floodplain, allows to estimate the major flood events losses for CCR, all the insurance societies (clients of CCR) and to measure the French State exposure at flood risk. Finally, the model is used in climate change impact studies, for instance the study carried out in 2018 in partnership with Météo-France for mainland France and for Out seas territories (Antilles and La Réunion) in 2019. Work is remaining for modelling the floods related to the pluvial network saturation the sanitation systems upwelling that can be triggered during intense rainfall events, notably in the most impervious urban areas.

Key words: runoff; modelling; precipitations; events;

INTRODUCTION

La modélisation des inondations par débordement et des phénomènes de ruissellement est au cœur des activités R&D de CCR depuis plus de dix ans. Un modèle d'aléa inondation opérationnel permet de caractériser le péril et de simuler les événements survenus. Ce modèle, régulièrement mis à jour, est calibré sur une sélection d'événements historiques survenus en France depuis 1999. Pour les événements non survenus mais néanmoins probables, un modèle probabiliste reposant sur un catalogue d'un millier d'événements fictifs a été développé afin de mesurer l'exposition financière de l'État, de CCR et des assureurs aux inondations. De par les nombreux événements simulés depuis la mise en place du modèle et grâce à une mise à jour régulière de ce dernier, CCR a acquis une expertise dans la simulation des dommages liés aux inondations. Cette connaissance de l'impact financier des risques hydrologiques a permis de démontrer qu'une part significative de la sinistralité due aux inondations n'est pas uniquement liée au débordement des cours d'eau mais également liée aux phénomènes de ruissellement pluvial [Moncoulon et al. 2014].

En 2019 et 2020, le modèle inondation a été utilisé à plusieurs reprises dans le cadre de la veille événementielle inondation, notamment lors d'événements survenus en 2019 entre les mois d'octobre, novembre et décembre en Occitanie, dans le Sud-Est et dans le Sud-Ouest de la France. En 2020, les inondations survenues dans l'Aude et les Pyrénées Orientales ont également été simulées. Le modèle est régulièrement mis en application en cas d'études sur l'exposition au risque des assureurs, au cours de projets de recherche tels que l'ANR (PICS) et H2020 (NAIAD). Afin de renforcer les mesures de prévention et la connaissance du risque de ruissellement, des études spécifiques sont menées, comme l'étude réalisée sur le bassin versant de la Bièvre en partenariat avec l'Institut Paris Région ou pour le compte de collectivités territoriales telles que l'EPTB Seine Grands Lacs et l'Entente Oise-Aisne.

METHODOLOGIE ADOPTEE POUR LA MODELISATION DE L'ALEA

Le modèle d'aléa ruissellement mis au point permet de simuler les écoulements des eaux de surface en tout point du territoire lorsque l'intensité des précipitations dépasse l'infiltration et la capacité de rétention en eau des sols. Cela est effectué pour tous les cours d'eau non jaugés de France et les sous bassins versants correspondants, créés à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT de l'IGN à 25 mètres de résolution) et de traitements géomatiques dédiés à l'hydrologie tels que les outils ArcGIS ArcHydro [Zhong, 2014].

Lorsque la pluie efficace est mesurée par la fonction d'infiltration des eaux de pluie implémentée dans le modèle, les écoulements de surface sont distribués sur les pentes du MNT et en fonction des différentes directions empruntées par les écoulements préférentiels. Ce routage des débits au sein de chaque sous bassin est facilité par un algorithme de direction des flux intégré dans le modèle en addition du MNT. Outre les données météorologiques et topographiques, des données d'entrée telles que les différents modes d'occupation du sol alimentent le modèle de ruissellement (Figure 1).

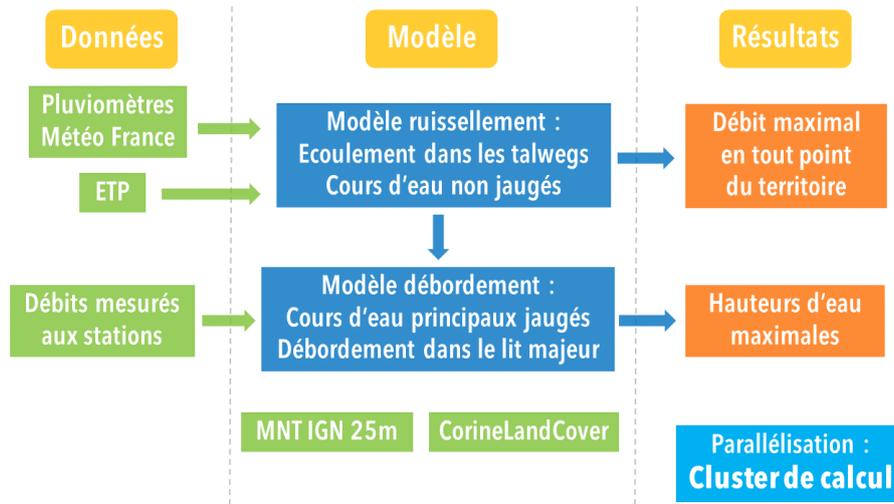


Figure 1 : Schéma fonctionnel du modèle inondation (CCR, 2019)

Pour la simulation des événements réels, les précipitations sont acquises depuis la Publiothèque de Météo-France pour toutes les stations pluviométriques de la région étudiée en fonction des données disponibles au lendemain de l'événement (pluies journalières, horaires et Evapotranspiration Potentielle). Quant au modèle de ruissellement probabiliste, celui-ci est constitué d'un catalogue d'un millier d'événements fictifs simulés à partir de 400 années de précipitations issues du modèle climatique ARPEGE-Climat de Météo-France [Moncoulon, Veysseire, 2018].

Les modes d'occupation du sol de Corine Land Cover à 250 mètres de résolution sont utilisés dans la production de l'aléa puisque ces derniers permettent d'appliquer un coefficient de Manning-Strickler, en renseignant la variation des valeurs de rugosité en surface, en fonction des différents types d'occupation du sol. Ces valeurs de rugosité de surface sont alors affectées pour chaque type d'occupation du sol [Moncoulon, 2014)]. Comme évoqué précédemment, les pluies efficaces sont distinguées des pluies infiltrées en fonction des types d'occupation du sol de Corine Land Cover dans la fonction d'infiltration implémentée dans le modèle.

Au-delà de son utilisation lors de la survenance d'événements, le modèle de ruissellement peut-être adapté pour la réalisation d'études et d'analyses d'exposition aux risques hydrologiques à échelles plus fines, sur le territoire d'une commune ou de petits bassins versants, avec une utilisation de données d'entrée (précipitations, MNT, occupation du sol, ...) plus précises lorsque celles-ci sont disponibles.

Cela à été le cas pour l'étude expérimentale sur le risque inondation dans le bassin versant de la Bièvre (Val-de-Marne et Hauts-de-Seine) menée en partenariat avec l'Institut Paris Région (IPR). Dans le cadre de projet, des données d'occupation du sol détaillées de l'Institut Paris Région (le MOS : Mode d'Occupation des Sols) et des données sur les réseaux d'assainissement (tracé du réseau et dimensionnement des conduites d'évacuation des eaux pluviales) fournies par la DSEA 94 (Direction des Services de l'Environnement et de l'Assainissement du Val-de-Marne) ont été intégrées dans le modèle inondation et utilisées pour simuler l'aléa sur le bassin versant de la Bièvre [Onfroy et al. 2019].

Le modèle pluie-débits de CCR est également valorisé dans le cadre de projets de recherche appliquée, à l'exemple de l'étude portant sur l'impact du changement climatique en France réalisée en 2018 pour la France métropolitaine et en 2019 sur les DOM en partenariat avec Météo-France et la société Risk Weather Tech [CCR, 2019]. A l'occasion de cette étude, le modèle de ruissellement a été transposé aux Outre-Mer pour pouvoir être utilisé d'une manière analogue à son application sur le territoire métropolitain. De nouvelles données d'entrée ont été intégrées incluant le MNT à 25 mètres de résolution de l'IGN disponible sur les territoires ultramarins, un découpage des îles en sous bassins versants ainsi que des données d'occupation du sol. Des événements tirés d'un catalogue de précipitations fictives ont été simulés, permettant de cartographier l'intensité des débits du ruissellement à différentes périodes de retour sur les Antilles françaises (Martinique, Guadeloupe, Saint-Martin et Saint Barthélemy) et pour l'île de la Réunion (figure 2).

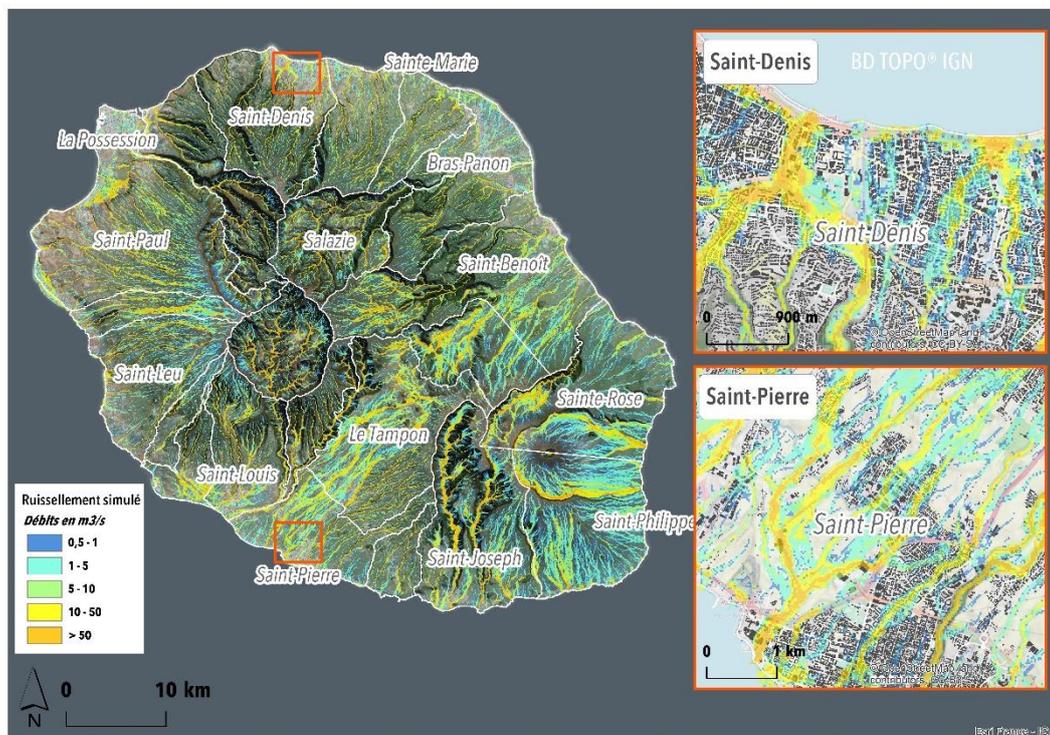


Figure 2 – Débits de ruissellement modélisés pour un événement fictifs sur l'île de la Réunion (CCR, 2019)

RESULTATS ET APPLICATIONS DU MODELE D'ALEA RUISSELLEMENT

Le modèle de ruissellement permet ainsi de simuler les écoulements des eaux de surface pour chaque sous bassin versant en tout point du territoire en cas de survenance d'un événement pluvieux et pour la simulation d'un millier d'événements fictifs pour l'alimentation d'un catalogue d'aléa probabiliste.

Lorsqu'un événement pluvieux intense se produit sur un territoire donné, le modèle de ruissellement reproduit les écoulements en surface à partir des données de précipitation avec en sortie, pour chaque maille du MNT et pour tous les cours d'eau non jaugeés, une valeur correspondant au débit maximal atteint au cours

de l'événement. Le routage des débits implémenté dans le modèle permet aux écoulements distribués sur les pentes du MNT de converger en aval, vers les talwegs.

Ces résultats opérationnels issus du suivi des événements climatiques sont présentés sous forme de cartographie de l'aléa modélisé à 25 mètres de résolution. A l'exemple du résultat de la simulation des crues torrentielles survenues en décembre 2019 dans le Sud-Ouest de la France dans la commune de Bielle (Pyrénées-Atlantiques) (Figure 3). Afin de fournir sous 5 à 7 jours une estimation des dommages aux biens assurés aux assureurs et à l'Etat, cet aléa est validé en fonction des remontées de la presse et du terrain, puis croisé avec les données de vulnérabilité disponibles dans les bases de données de CCR. Il s'agit notamment de données relatives aux risques de particuliers et de professionnels géo localisés fournies par les assureurs et régulièrement mis à jour par CCR.

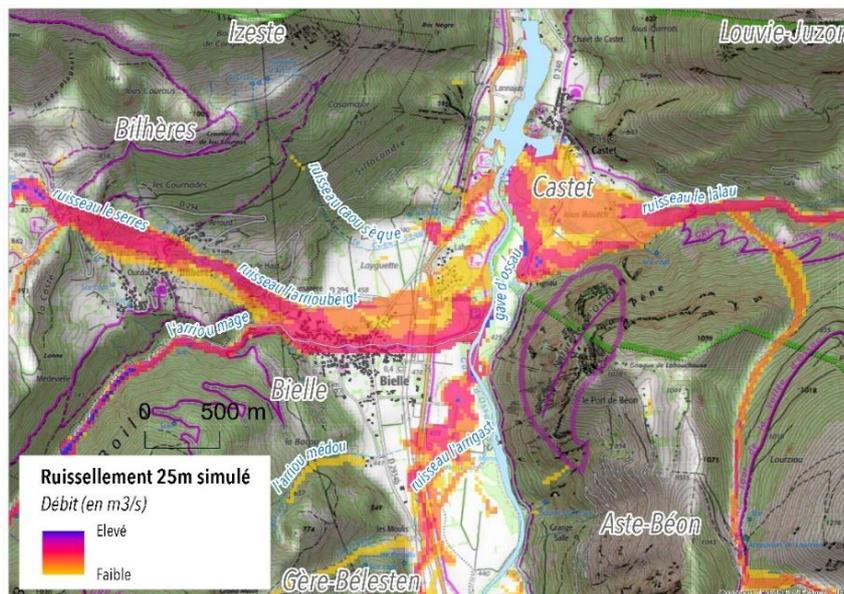


Figure 3 - Crue torrentielle survenue en décembre 2019 à Bielle - Pyrénées Atlantiques (CCR, 2019)

En ce qui concerne la simulation probabiliste, le catalogue d'événements produit une distribution du débit maximum de ruissellement pour chaque maille de 25 mètres sur l'ensemble du pays pour cinq périodes de retour de l'aléa (de inférieure à 10 ans jusqu'à supérieure à 200 ans). L'intensité de l'aléa est ainsi estimée en tout point du territoire pour une période de retour donnée. Du fait de la fonction d'infiltration et de la prise en compte des modes d'occupation du sol, l'étalement des phénomènes de ruissellement pluvial apparaît plus prononcé sur les secteurs imperméabilisés que dans les zones végétalisées (Figure 4).

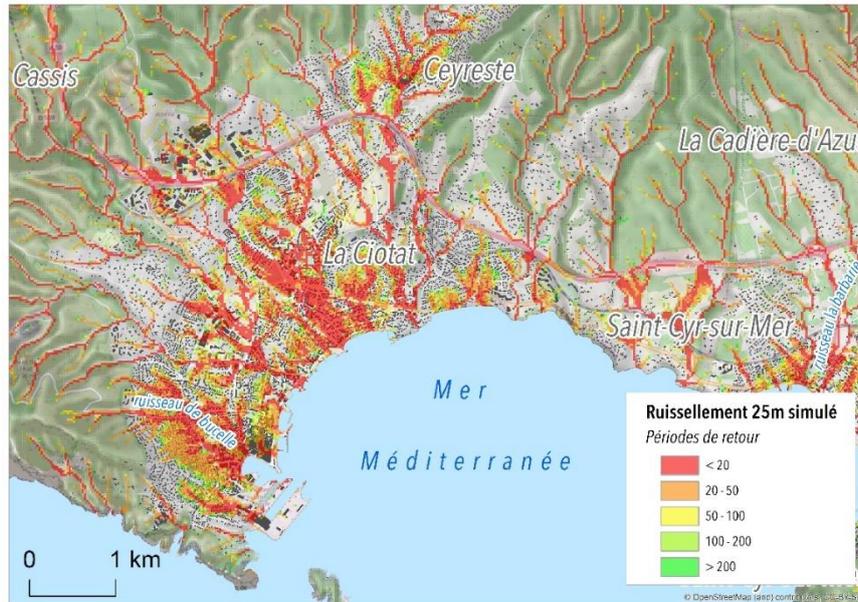
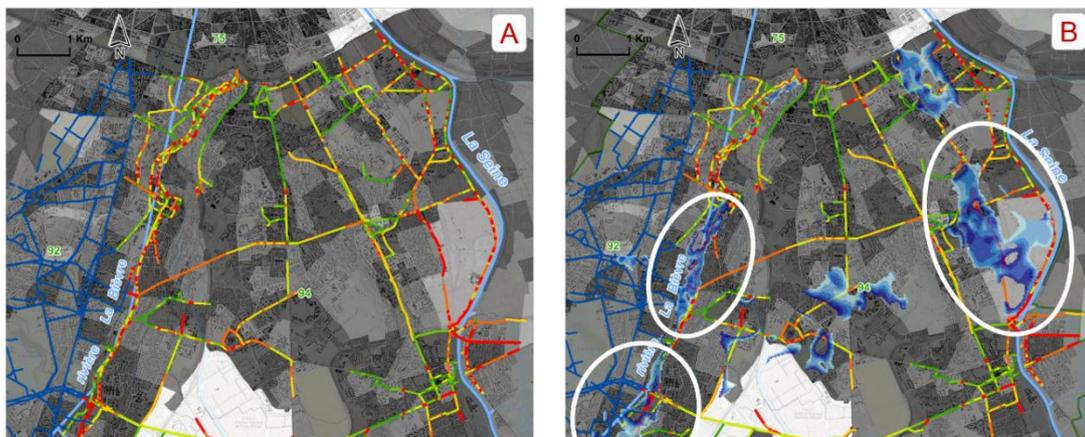


Figure 4 - Aléa ruissellement probabiliste dans le secteur de la Ciotat - Bouches-Du-Rhône (CCR, 2019)

L'étude réalisée sur le bassin versant de la Bièvre en partenariat avec l'Institut Paris Région en 2018, reposant sur le croisement de données d'entrée à haute résolution telles que le MOS (Mode d'Occupation des Sols) et les données relatives aux réseaux d'assainissement du Val de Marne et des Hauts-de-Seine, a permis d'élaborer un indicateur d'exposition infra-communal au risques hydrologiques combinant risque d'inondation par ruissellement pluvial et risque d'inondation par saturation et remontées du réseau d'évacuation des eaux pluviales. La localisation précise des réseaux d'assainissement urbains, lorsque celle-ci est connue, permet de caractériser le risque de remontée de ces réseaux en cas de saturation de ces derniers en fonction de la pente, de la section mouillée, du rayon hydraulique et du coefficient de rugosité de chaque conduite du réseau. Ces attributs, lorsqu'ils sont renseignés, permettent de calculer un débit à partir duquel la conduite sera saturée et produira, le cas échéant, un débordement par résurgence du réseau. Ainsi, une cartographie des conduites avec un indice de saturation des ouvrages a été réalisée dans le cadre de l'étude sur la Bièvre (figure 5).



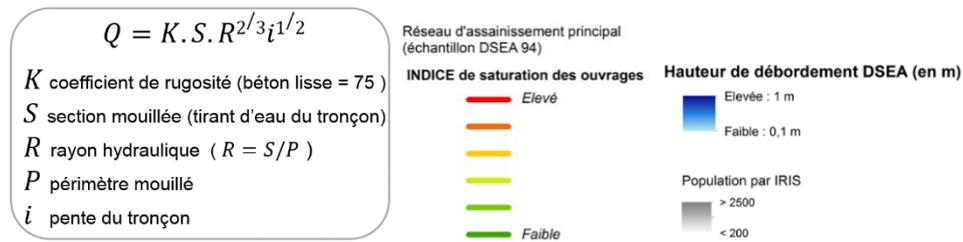


Figure 5 - Débit à saturation calculé sur le réseau de la DSEA 94 (A) et débordement des réseaux en juillet 2001 (B) (CCR - 2018)

Les ouvrages dont l'indice de saturation est élevé (A) correspondent généralement aux zones de débordement par résurgence du réseau relevées suite à l'orage de juillet 2001 (B).

Sur la base de ces travaux, il a été choisi de considérer tout secteur situé dans un rayon de 150 m des principaux réseaux d'assainissement comme zone exposé aux remontées des réseaux. L'indicateur de l'indicateur qualitatif de l'étude sur la bassin versant de la Bièvre a été établi grâce à la superposition de deux facteurs constitutifs des risques hydrologiques existants dans le bassin versant de la Bièvre : la présence de réseaux d'assainissement (des zones tampon de 150 m ont été constituées autour du réseau d'assainissement principal DSEA du 94 et du réseau Open Data du 92) et l'aléa ruissellement causé par l'orage de juillet 2001 simulé à partir des pluies de l'événement, du MOS de l'IAU et du MNT à 25m de l'IGN. Ces deux éléments ont été superposés sous SIG via une analyse spatiale de superposition. Cela a permis de produire l'indicateur d'exposition aux risques hydrologiques dans la partie la plus urbanisée du bassin. Le résultat est représenté sous forme de mailles à une résolution de 250m (figure 6). Pour chaque maille de 250m, la surface occupée par les deux éléments a été calculée et un indicateur d'exposition (de 0 à 100 % d'exposition) a été établi. A titre d'exemple, une maille considérée comme exposée à 100 % aux risques hydrologiques - en violet - est entièrement occupée par la superposition de l'aléa ruissellement et des réseaux d'assainissement. Les deux éléments occupent donc chacun la totalité de la maille : cela équivaut à un indicateur d'exposition au « score » maximal de 100 %. Un score d'exposition de 60 % correspond à une maille dont la surface est occupée à la fois par la totalité de l'un des éléments et par 1/10ème du second élément. La surface d'une maille à exposition élevée (en rouge) est remplie en totalité par un seul des deux éléments ou une proportion variable des deux éléments. Une maille considérée comme modérément exposée (en orange) est à moitié occupée par un seul des deux éléments ou une proportion variable des deux éléments. Enfin, une maille à exposition faible (en jaune) est remplie sur le quart de sa surface par un seul des deux éléments ou une proportion variable de ces derniers

L'indicateur final a été produit à 250 mètres de résolution et permet de localiser les zones les plus exposées à ces risques hydrologiques au sein des communes, situées au sud de Paris en amont de la confluence entre la Bièvre et la Seine (Figure 6). La validation a été effectuée pour chaque maille avec les données de sinistralité d'événements inondations historiques, notamment les sinistres géo localisés de l'orage intense survenu en juillet 2001 sur l'agglomération parisienne. La localisation des sinistres est cohérente avec l'indicateur proposé. En effet, plus de 70 % des sinistres ont été comptés dans la classe identifiée en risque « Elevé » et « Très Elevé ».

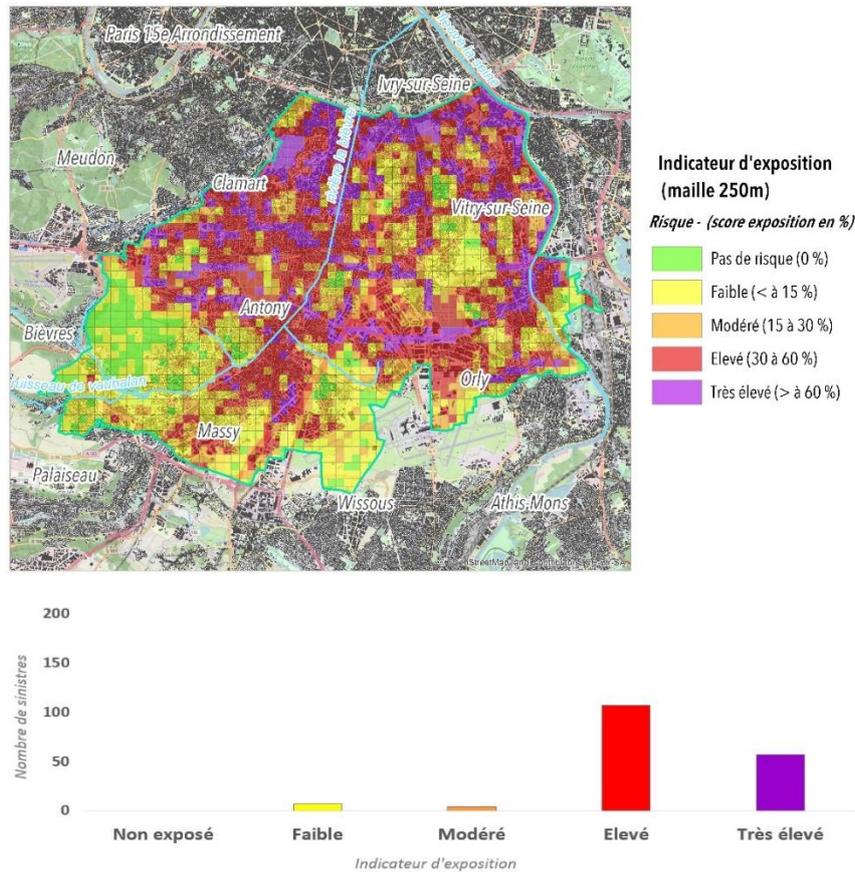


Figure 6 - Indicateur d'exposition aux risques hydrologiques agrégé à la maille 250m
et sinistres de l'orage de juillet 2001 comptés dans chaque classe d'exposition
(Bassin versant de la Bièvre, Val-de-Marne)

Enfin, les résultats de l'aléa ruissellement probabiliste, sont partagés sous forme de classes d'intensité des débits simulés pour chaque période de retour sont fournis aux assureurs ou en cas de demandes spécifiques de collectivités locales telles que des EPTB, afin qu'ils puissent bénéficier d'une cartographie de l'exposition de leurs risques ou de leur territoires au risque de ruissellement pluvial. Les pertes moyennes annuelles modélisées pour le péril inondation (phénomènes de débordement et de ruissellement) au titre du régime Cat Nat et agrégées à l'échelle communale sont également transmises aux assureurs et aux collectivités en cas de demande.

CONCLUSIONS

Le modèle inondation de CCR permet de simuler les événements survenus et non survenus mais néanmoins probables afin d'estimer le montant des dommages assurantiels dus aux inondations par débordement et ruissellement. Le modèle est utilisé de façon opérationnelle lors de la survenance d'une inondation sur un territoire donné et ses résultats sont fournis lors d'études réalisées dans le cadre de projets de recherche ou en cas de demandes de collectivités territoriales de bassin. A terme, des données d'entrée à plus fine échelle pourront être intégrées dans la chaîne de modélisation afin de réduire les incertitudes liées à la précision des données relatives à la topographie ou à l'occupation des sols par exemple. Enfin, il est important de pouvoir

pérenniser les partenariats déjà constitués avec les collectivités locales et les établissements publics de bassins (tels que les ETPB par exemple) mais également d'en constituer de nouveaux afin d'accéder à des données locales et modéliser l'aléa inondation à l'échelle la plus fine possible sur le territoire français.

NOMENCLATURE

CCR: Caisse Centrale de Réassurance

ANR (PICS): Préviation Immédiate intégrée des Impacts des Crues Soudaines

H2020 (NAIAD): Nature Insurance Value: Assessment and Demonstration

EPTB: Établissement Public Territorial de Bassin

REFERENCES

Moncoulon, D. et al. (2014). - *Analysis of the French insurance market exposure to floods: a stochastic model combining river overflow and surface runoff*. CCR, GET, IRSTEA, Macif. NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences)

Moncoulon, D. Veysseire, M (2018). - *Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050*. CCR

Onfroy, T. Moncoulon, D. Faytre, L (2019). - *Etude expérimentale sur le risque inondation dans le bassin versant de la Bièvre*. Cahiers de l'ONRN; Le partage des données pour une meilleure connaissance des risques naturels; ONRN, 2019; Vol. 3, pp. 35–47

Zhong L. (2014). - *Watershed modeling using arc hydro based on DEMs: a case study in Jackpine watershed*. Environmental Systems Research; 3, 11