

Quel intérêt de prévisions d'ensemble des crues éclair et de leurs impacts pour un service de secours ? Une évaluation basée sur un modèle multi-agents, pour les inondations d'octobre 2018 dans le bassin de l'Aude (France)

Interest of ensemble flash-flood impacts forecasts for an emergency service: an evaluation based on the multi-agent modeling of the October 2018 flood event in the Aude River basin (France)

Auteurs : CHARPENTIER- NOYER Maryse^{1,2*}, NICOLLE Pierre¹, PAYRASTRE Olivier¹ et GAUME Eric¹

*** auteur correspondant**

¹ Univ Gustave Eiffel, GERS-LEE, F-44344 Bouguenais, France

² DREAL Centre, SHPECI/DPECI, 45064 Orléans, France, e-mail : maryse.charpentier-noyer@developpement-durable.gouv.fr

Résumé : Les crues éclair représentent une part importante des décès et dommages matériels associés aux inondations dans le monde. Une meilleure anticipation de ces phénomènes fait partie des mesures d'adaptation les plus attendues dans les années à venir. Ce travail vise à évaluer l'utilité de prévisions probabilistes (prévisions d'ensemble) à courte échéance (+6h) des impacts des crues éclair, pour les décisions d'intervention d'un service de secours. Le cas d'étude retenu correspond aux crues du 15 octobre 2018 dans l'Aude, ces inondations restant parmi les plus importantes observées dans le sud de la France ces dernières années.

Les chaînes de prévisions évaluées combinent trois nouveaux produits de prévision d'ensemble des pluies à +6h, et un modèle hydrologique distribué. Une première évaluation des prévisions hydrométéorologiques obtenues a confirmé une très bonne anticipation des dépassements de seuils de débits lorsque les percentiles 75% de la prévision d'ensemble sont utilisés, avec néanmoins une quantité significative de fausses alarmes (Charpentier-Noyer et al., 2023). Cette chaîne de prévision hydrométéorologique est complétée ici par un modèle d'impacts simple représentant le nombre de bâtiments inondés pour chaque tronçon de cours d'eau, en se basant sur des scénarios d'inondations prédéfinis pour des périodes de retour de 2 à 1000 ans (Le Bihan et al., 2017).

La valeur des prévisions ensemblistes d'impacts obtenues est évaluée à partir d'un modèle multi-agents qui simule les prises de décision et les interventions de terrain du SDIS de l'Aude, dans une situation fictive où les décisions sont prises à partir du percentile 75% des prévisions d'ensemble. Cette approche d'évaluation, basée sur des hypothèses qui se veulent réalistes (bien qu'encore améliorables), permet de mesurer les avantages liés à une meilleure anticipation des impacts, ainsi que les coûts liés aux fausses alarmes, qui conduisent à la mobilisation inutile de certaines équipes de secours, au détriment de certains lieux réellement touchés. Malgré cela, la plus-value de l'utilisation des prévisions ensemblistes d'impacts pour déclencher les interventions de secours est systématiquement confirmée, par rapport à l'approche consistant à attendre des remontées de terrain (appels d'urgence, ...), à condition que les moyens de secours disponibles restent proches de la réalité. Néanmoins, les résultats montrent également que dans le cas où les moyens d'interventions (nombre d'équipes de secours) sont limités, la présence des

fausses alarmes peut limiter l'intérêt des prévisions d'ensemble des pluies, par comparaison à l'utilisation d'un scénario naïf de pluies futures nulles.

Mots-clefs : Crue soudaine, prévision d'ensemble, impacts, modèle multi-agents

Abstract : Flash floods represent an important part of the flood damages and fatalities in the world. A better anticipation of these floods is one of the most expected adaptation measure in the future years. This contribution aims at evaluating the value of short range (0-6h) ensemble flash-flood impacts forecasts for the crisis decision making of an emergency service. The case study corresponds to the Aude River flash floods that occurred on October 15, 2018, and which are among the most important flash floods observed in southern France in the recent years.

The tested flash-flood impacts forecasting chains combine three new rainfall ensemble forecast products and a distributed rainfall-runoff model. A preliminary evaluation of this hydrometeorological chain showed a good detection of discharge threshold crossings when the 75% percentiles of the ensemble forecasts are considered, but also a significant number of false alarms (Charpentier-Noyer et al., 2023). This hydrometeorological chain has been complemented here with a simple impacts model for each river reach, estimating the number of inundated buildings based on a predefined library of inundation scenarios (Le Bihan et al., 2017).

The value of the ensemble impacts forecasts is finally evaluated based on the implementation of a multi-agent model, which simulates the decisions and the field operations of an emergency service, in a fictive situation where decisions are based on the 75% percentiles of the ensemble forecasts. This evaluation approach, based on rather realistic assumptions (even if they could still be improved), allows us to illustrate and measure the gains associated with a better anticipation of impacts, and the costs associated with false alarms, which lead to the unnecessary mobilization of rescue teams, to the detriment of impacted locations. Despite this negative effect of false alarms, the added value of using ensemble flash-flood impacts forecasts to trigger field operations, instead of waiting for emergency calls, is systematically confirmed when the number of available rescue teams is close to reality. However, the results also show that in case of limited means for safety operations (low number of rescue teams), false alarms highly limit the interest of using ensemble rainfall forecasts, when compared to a naive zero future rainfall scenario.

Keywords: flash flood, ensemble forecast, impacts, multi-agent model

1. Introduction

Les crues soudaines représentent une part importante des dommages et des décès liés aux inondations (Barredo, 2006; CCR, 2020; Petrucci et al., 2019). Il est crucial d'anticiper davantage ces phénomènes pour limiter leur impact sociétal. Aujourd'hui, les systèmes opérationnels de prévision ou d'avertissement aux crues soudaines sont souvent basés sur l'utilisation des observations de pluie par radar, offrant de ce fait une anticipation limitée. Par ailleurs, ces systèmes ne rendent généralement pas encore compte de la sévérité de l'inondation en termes d'impacts, ce qui limite leur caractère informatif pour des services de secours.

Des produits de prévision d'ensemble des pluies à courte échéance ont été développés au cours des dernières années pour favoriser la meilleure anticipation des crues éclair (Charpentier-Noyer et al., 2023; Godet et al., 2023). Par ailleurs, des approches de cartographie automatisée permettent aujourd'hui d'associer assez facilement des modèles d'impacts aux prévisions hydrométéorologiques (Le Bihan et al., 2017).

Dans le cadre de cette étude, l'objectif a été d'évaluer dans quelle mesure des chaînes de prévision combinant ces deux avancées (meilleure anticipation des pluies via des approches ensemblistes, et représentation des impacts) peuvent favoriser les opérations de secours lors des crues éclair. La meilleure anticipation offerte par la prévision d'ensemble des pluies peut en effet également se traduire par un nombre important de fausses alarmes, ce qui peut s'avérer contreproductif dans un contexte de gestion de crise. Pour pouvoir mesurer les gains réels obtenus via l'utilisation de prévisions hydrométéorologiques d'ensemble, un modèle multi-agent a été appliqué pour représenter de façon détaillée les interventions des équipes de secours, ainsi que le processus de prise de décision permettant de déclencher ces interventions à partir des prévisions disponibles. Cette approche d'évaluation est illustrée ici au travers du cas des crues de l'Aude en octobre 2018, qui ont causé des dommages importants et nécessité un grand nombre d'opérations de secours.

L'article présente dans un premier temps les caractéristiques détaillées de cet événement, ainsi que les interventions de secours effectivement menées par le SDIS de l'Aude. La chaîne de prévision ensembliste des impacts des crues soudaines est ensuite présentée, ainsi que le principe d'évaluation basé sur une modélisation multi-agents, qui permet de simuler le déclenchement des interventions du SDIS de l'Aude à partir des prévisions d'impacts. Les résultats obtenus sont détaillés et discutés en fin d'article.

2. Présentation du cas d'étude

2.1. Les crues éclair de l'Aude des 14-16 octobre 2018

Un événement de précipitations très intenses s'est produit dans le bassin de l'Aude pendant la nuit du 14 au 15 octobre 2018. La partie intermédiaire du bassin versant, en aval direct de Carcassonne, a été la plus durement touchée, avec des cumuls de pluie atteignant jusqu'à 300 mm. Ces pluies ont été particulièrement extrêmes sur de courtes durées, le pluviomètre situé à Villegailhenc enregistrant jusqu'à 60 mm en une heure et 213 mm en six heures, alors que le cumul de pluie centennale est d'environ 200 mm en six heures dans ce secteur. L'intensité et l'étendue spatiale de cet événement s'avèrent comparables à ceux observés dans la région lors la tempête de novembre 1999.

Ces fortes précipitations dans la partie centrale du bassin de l'Aude ont causé des débordements importants de l'Aude et de ses affluents (Lauquet, Orbiel, Trapel), dans la région située à l'aval de Carcassonne. Ces inondations ont causé 14 décès, environ 100 blessés et des dommages aux biens assurés estimés aux alentours de 220 millions d'euros (CCR, 2018). A Trèbes, le débit de l'Aude a atteint un niveau proche du débit centennal, neuf heures seulement après le début des précipitations.

Les variabilités spatiales et temporelles importantes des précipitations et des écoulements observés lors de cet événement en font un cas d’étude intéressant pour évaluer les performances des prévisions hydrométéorologiques ensembles à courte échéance.

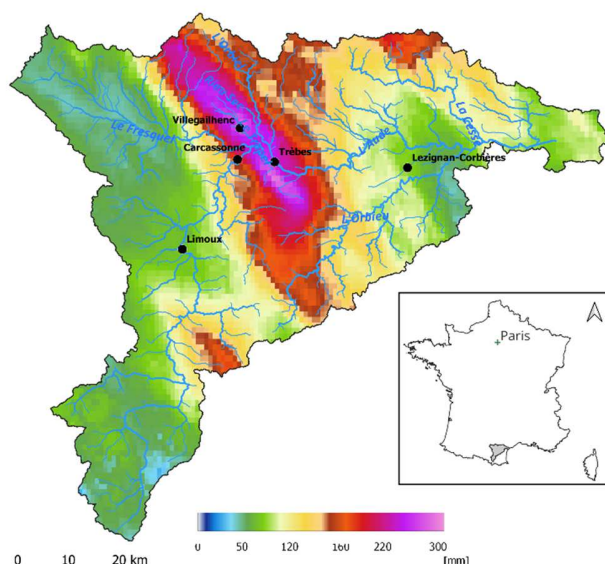


Figure 1 : Cumul de pluie observé lors des crues d’octobre 2018 de l’Aude (cumul du 14/10/2018 00 : 00 au 15/10/2018 23 : 00 obtenu à partir de la lame d’eau Antilope J+1)

2.2. Organisation et opérations des services de secours lors de la crue

Dans le département de l’Aude, le centre principal du SDIS (Service Départemental d’Incendie et de Secours) est situé à Carcassonne, et 41 autres centres locaux sont répartis dans tout le département (cf. Figure 2 a). Le plan départemental d’analyse des risques précise les ressources matérielles mobilisables en cas d’inondation. Ainsi, les camions citerne feu (CCF) sont les véhicules d’intervention les plus couramment utilisés lors des inondations. Ces véhicules ont l’avantage d’être surélevés et tout-terrain, ce qui leur permet d’intervenir de manière étendue malgré des conditions météorologiques et de circulation difficiles. Dans le département, 92 véhicules de ce type étaient disponibles en 2018, et répartis dans les centres locaux du SDIS (cf. Figure 2 a).

Lors des inondations d’octobre 2018, de nombreuses opérations de secours ont été réalisées par le SDIS de l’Aude. La localisation de ces interventions est représentée sur la Figure 2 b). Environ trente secteurs d’intervention peuvent être identifiés dans la zone de modélisation (exactement 32), chaque secteur ayant pu mobiliser plusieurs équipes de secours, et étant représenté par un cercle noir d’un diamètre de 2 km, afin de prendre en compte non seulement l’imprécision sur l’emplacement exact des interventions (seul le nom de la commune est fourni), mais aussi les éventuels déplacements locaux des équipes de secours. Lors de l’événement, les décisions d’intervention ont principalement été prises à la suite de la réception d’informations (appels) sur les inondations observées.

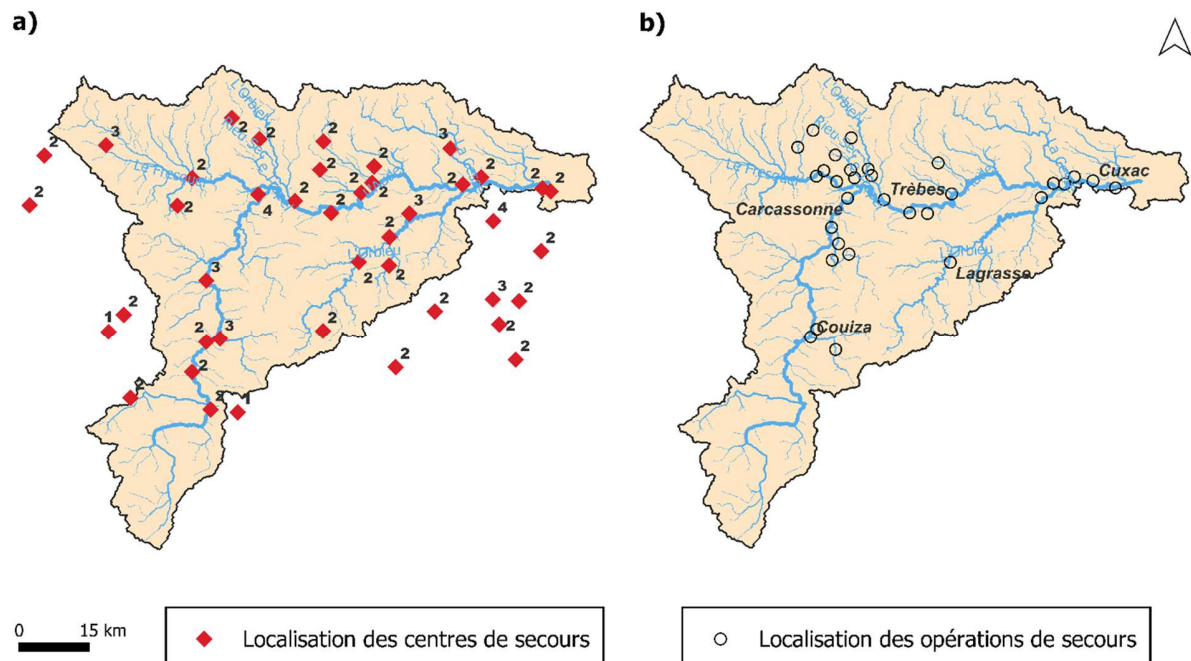


Figure 2 : Organisation générale des secours pendant l'événement d'octobre 2018 : a) Localisation des différents centres du SDIS et nombre de véhicules CCF par centre et b) Localisation des interventions effectuées

3. La chaîne de prévision des crues évaluée

3.1. Les prévisions hydrométéorologiques d'ensemble à +6h

La chaîne de prévision d'ensemble à courte échéance évaluée dans ce travail est celle mise en œuvre par Charpentier-Noyer et al. (2023). Elle repose sur le modèle hydrologique distribué Cinecar (Naulin et al., 2013), qui a été appliqué ici sur un découpage du bassin de l'Aude en 1174 sous-bassins (d'environ 5km²), et a été ajusté sur l'événement d'octobre 2018 de façon à obtenir un scénario de crue simulé qui se rapproche autant que possible des débits observés (Hocini et al., 2021). La Figure 3 a) présente les pics de débits simulés avec la lame d'eau Antilope J+1 pour les 1174 sous-bassins découpés. Ces débits s'avèrent globalement cohérents avec les observations disponibles, avec des écarts sur les débits de pointe qui n'excèdent que rarement 20%. Il est important de signaler ici que le modèle hydrologique utilisé étant ajusté sur l'événement, les résultats de prévision qui vont être évalués par la suite négligent l'effet des erreurs de modélisation hydrologique, et ne mesurent que les erreurs liées aux prévisions de pluie.

Pour obtenir des prévisions d'ensemble des débits à +6h, le modèle Cinecar a été forcé par trois produits de prévision d'ensemble des pluies basés sur le modèle AROME-FR développé par Météo-France. Ces trois produits ont une résolution temporelle horaire et une résolution spatiale proche du km², mais présentent des combinaisons différentes des membres constituant les ensembles :

- **AROME-PE** est la version de prévision d'ensemble d'AROME-FR (Bouttier et al., 2012; Raynaud & Bouttier, 2016), composée de 12 membres en 2018 ;

- **Pepi** est une combinaison expérimentale d'AROME-PE et d'AROME-PI (Auger et al., 2015; Osinski & Bouttier, 2018). Pepi fournit des prévisions pour une durée maximale de 6 heures et combine les 12 membres de la dernière exécution d'AROME-PE avec 1 à 6 membres d'AROME-PI, en fonction de l'échéance de prévision considérée
- **PertDpepi** est un autre produit expérimental créé en décalant les membres originaux de Pepi de 20 km dans les quatre directions cardinales pour tenir compte des incertitudes dans la localisation des précipitations prévues (Vincendon et al., 2011). Le produit résultant a cinq fois plus de membres que l'ensemble Pepi, soit de 65 à 90 membres selon l'échéance de prévision.

Enfin, un scénario naïf de pluies futures nulles a été ajouté pour servir de référence et mesurer l'apport des prévisions de pluies utilisées.

Charpentier-Noyer et al. (2023) ont conduit une première évaluation des prévisions hydrométéorologiques obtenues avec cette chaîne pluie-débit pour les crues d'octobre 2018, en se focalisant sur la capacité à détecter de façon anticipée les dépassements de seuils de débit de période de retour 10 ans. Cette première évaluation a confirmé l'intérêt des prévisions basées sur les trois ensembles de pluies, qui permettent une meilleure anticipation des dépassements lorsque les quantiles 75% des prévisions d'ensemble sont utilisés. Néanmoins, l'évaluation a également montré que l'utilisation de ce quantile de la prévision d'ensemble conduit à un nombre significatif de fausses alarmes. La modélisation multi agents mise en œuvre dans la suite de cet article vise précisément à mieux mesurer l'effet négatif potentiel des ces fausses alarmes, pour des utilisateurs des prévisions tels que les services de secours.

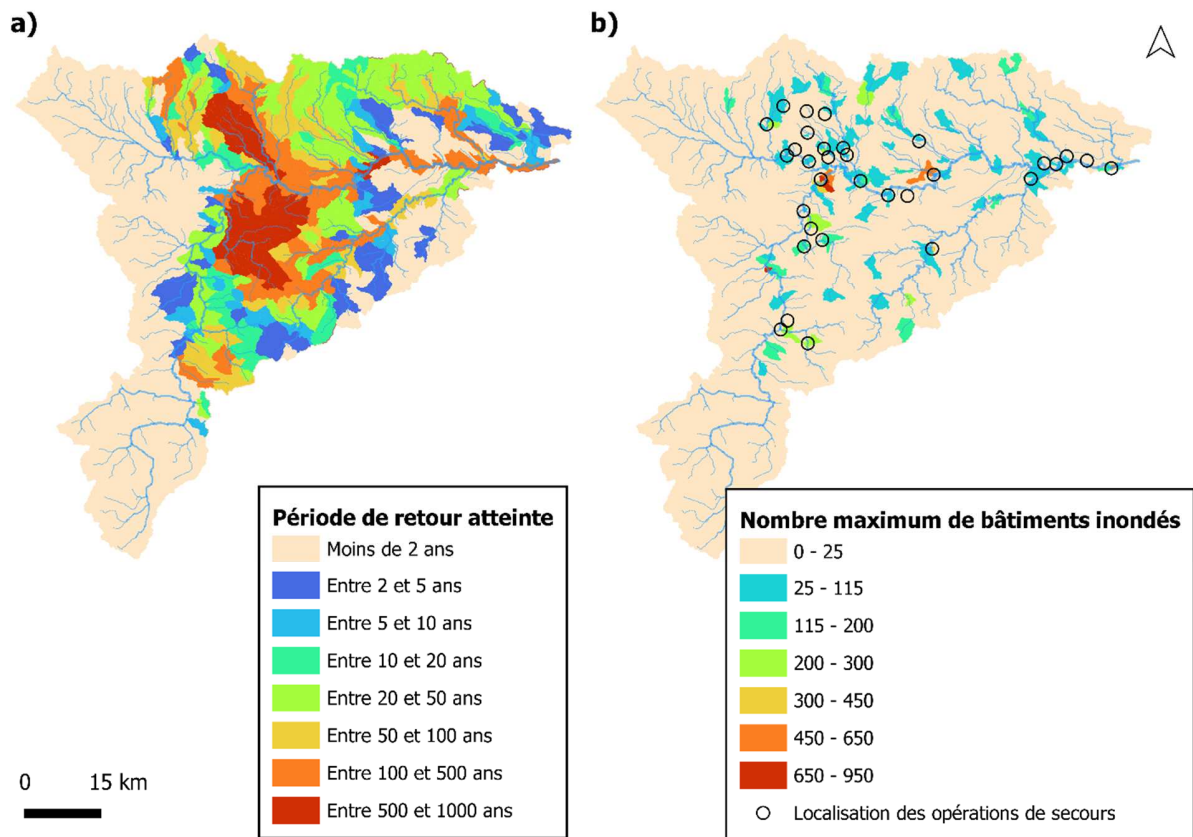


Figure 3 : Illustration des résultats de simulation hydrologique à partir des pluies Antilope J+1 a) périodes de retour des pics de débits et b) nombre maximum de bâtiments inondés par tronçon de modélisation

3.2. La prévision des impacts

Le modèle mis en œuvre pour la prévision des impacts suit le principe simple proposé par Le Bihan et al. (2017), qui consiste à construire une relation continue et univoque entre débit et impacts d'inondation à l'échelle du tronçon de rivière, à partir d'un catalogue de scénarios d'inondation de périodes de retour variées. Les scénarios d'inondation utilisés ici sont ceux mis en œuvre par Nicolle et al. (2021) pour des périodes de retour de 5 à 1000 ans (7 scénarios), en combinant les données de débits de la base nationale SHYREG (Arnaud et al., 2014) et le modèle hydrodynamique Floodos (Hocini et al., 2021). L'objectif du modèle d'impacts développé est de représenter les besoins en termes d'assistance aux personnes et de mise en sécurité. Le modèle se base sur un dénombrement des bâtiments inondés susceptibles d'accueillir des personnes, réalisé à partir de la BD TOPO de l'IGN, cette information s'avérant plus simple à exploiter que des données de population. Pour chaque tronçon de cours d'eau, la relation débit-impacts a par conséquent été établie de la manière suivante : i) calcul du nombre de bâtiments avec des hauteurs d'eau supérieures à 10 cm dans l'emprise inondée de période de retour k ans et ii) interpolation linéaire entre les scénarios de période de retour k et $k+1$ ans. La Figure 3 b) présente le nombre maximum de bâtiments inondés simulé pendant l'événement pour chacun des 1174 tronçons de cours d'eau modélisés. Cette Figure montre que les tronçons de rivière où la simulation identifie au moins 25 bâtiments inondés correspondent relativement

bien à la localisation des interventions de secours effectivement réalisées lors de l'événement (Figure 2 b)).

4. Méthode d'évaluation : un modèle multi-agents représentant les interventions des secours

Le modèle multi-agents mis en œuvre a pour objectif de représenter les interventions de terrain des équipes de secours du SDIS et leur dynamique temporelle, en fonction des critères utilisés pour déclencher des interventions (attente de remontée d'informations de terrain, ou utilisation des prévisions d'impacts). Le scénario auquel le SDIS doit faire face est celui simulé par le modèle d'impacts à partir des pluies observées Antilope J+1, et est présenté sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** b. La modélisation multi-agents permet de mesurer l'efficacité des interventions de secours, en comparant la localisation et l'horaire des impacts (nombre de bâtiments inondés) et la position correspondante des équipes de secours.

4.1. Représentation des équipes de secours

Pour la modélisation, chaque CCF est assimilé à une équipe d'intervention, car les véhicules disponibles constituent de facto un facteur limitant le nombre d'équipes mobilisables. Les 92 équipes de secours sont initialement positionnées dans leur centre de secours (Figure 2 a)). La position de chaque équipe est par la suite représentée à l'échelle du tronçon de cours d'eau. Quatre états peuvent être attribués à chacune des équipes de secours : i) au centre de secours, ii) en déplacement vers un tronçon de rivière, iii) en intervention sur un tronçon et iv) intervention terminée, pouvant être de nouveau déployée vers un autre tronçon. Cet état est actualisé au pas de temps 15 minutes, pas de temps correspondant à celui de la modélisation hydrologique. Le temps de déplacement des équipes de secours depuis les centres jusqu'à un tronçon est représenté en fonction d'une vitesse de déplacement moyenne de 30 km/h, correspondant à des conditions de circulation dégradées par les intempéries.

4.2. Critères de décision pour les interventions

La décision d'envoyer une équipe de secours sur un tronçon de cours d'eau dépend de trois paramètres définis de la manière suivante.

Le **seuil d'intervention** correspond au nombre minimum de bâtiments inondés nécessaire pour justifier une intervention. Lorsque le nombre de bâtiments inondés n'atteint pas ce seuil, aucune équipe n'est envoyée sur place. Le seuil d'intervention a été fixé à 25 bâtiments ici.

La **capacité d'intervention** correspond au nombre de bâtiments inondés pouvant être secourus par une équipe d'intervention. Si nécessaire, plusieurs équipes peuvent être envoyées sur un même tronçon lorsque le nombre de bâtiments inondés prévu dépasse la capacité d'intervention d'une seule équipe. Cette capacité d'intervention a été fixée ici à 100 bâtiments par équipe, en partant du principe que les bâtiments inondés ne nécessitent pas tous une intervention d'assistance ou secours aux personnes. L'intervention dure jusqu'à ce que le nombre de bâtiments impactés redescendent sous la valeur du seuil d'intervention.

La **réaffectation des moyens** est un paramètre booléen correspondant à la possibilité de réaffecter une équipe d'intervention lorsqu'elle n'a plus d'opération de secours à effectuer sur le

tronçon où elle a été envoyée. Dans les modélisations réalisées ici, les équipes peuvent être réaffectées dès que le nombre de bâtiments touchés repasse sous le seuil d'intervention.

Le dépassement du seuil d'intervention de 25 bâtiments est apprécié successivement à partir des impacts simulés par le modèle à partir des pluies observées (cas analogue au déclenchement des interventions à partir des remontées d'informations de terrain), puis à partir des impacts maximums prévus à +6h à partir des prévisions hydrométéorologiques. Pour les prévisions se présentant sous forme d'ensembles, le percentile 75% de l'ensemble a été utilisé pour apprécier le dépassement du seuil d'intervention de 25 bâtiments, ce qui engendre une meilleure anticipation, mais également un nombre plus important de fausses alarmes et donc de mauvaises décisions d'intervention.

4.3. Sorties du modèle et critère d'évaluation

L'exécution du modèle multi-agent permet d'obtenir une description détaillée de la position et de l'état de chaque équipe de secours à chaque pas de temps le long de l'événement. Il est ainsi possible d'obtenir l'évolution du nombre de bâtiments bénéficiant de secours au cours de l'événement, ainsi que l'évolution du nombre d'équipes mobilisées (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Afin d'évaluer l'efficacité des interventions, une fonction de coût est calculée pour représenter le nombre de bâtiments inondés n'ayant pas bénéficié de secours rapides. Cette fonction est calculée de la manière suivante : i) si une équipe de secours est présente sur le tronçon au moins une heure avant l'inondation, on considère que tous les bâtiments ont bénéficié de secours adaptés (coût=0 bâtiment), ii) si l'équipe arrive sur le tronçon moins d'une heure avant l'inondation et moins d'une heure après, on considère que 50% des bâtiments ont pu bénéficier de secours rapides (coût = $0.5 \times \text{Nb de bâtiments inondés}$), et iii) si l'équipe de secours arrive plus d'une heure après l'inondation, les secours s'avèrent trop tardifs pour l'ensemble des bâtiments (coût = Nb de bâtiments inondés).

5. Résultats

5.1. Résultats dans le cas fictif d'un nombre illimité d'équipes de secours

Cette première simulation, présentée sur la Figure 4, correspond au cas idéal mais irréaliste où un nombre illimité d'équipes de secours sont disponibles. Les résultats de cette première simulation montrent que l'anticipation offerte par les produits de prévision d'ensemble des pluies est suffisante pour réduire la fonction de coût à une valeur proche de 0. Cela signifie que la quasi-totalité des bâtiments inondés bénéficient de l'intervention d'une équipe de secours 1h avant le début de l'inondation (Figure 4.b et d). Mais l'obtention de ce résultat très positif implique la mobilisation d'un très grand nombre d'équipes de secours (plus de 300 équipes) lorsque les interventions sont déclenchées à partir des prévisions d'ensemble de pluies (Figure 4.c). A titre de comparaison, environ deux fois moins d'équipes sont mobilisées lorsque les décisions sont prises à partir d'une prévision naïve (pluie future nulle) ou sur remontée d'information de terrain (pluie observée), même si ceci se traduit par des valeurs plus élevées

de la fonction cout, en raison du manque d’anticipation. Ceci traduit le fait que l’utilisation des prévisions d’ensemble des pluies conduit à mobiliser un grand nombre d’équipes supplémentaires en raison de fausses alarmes.

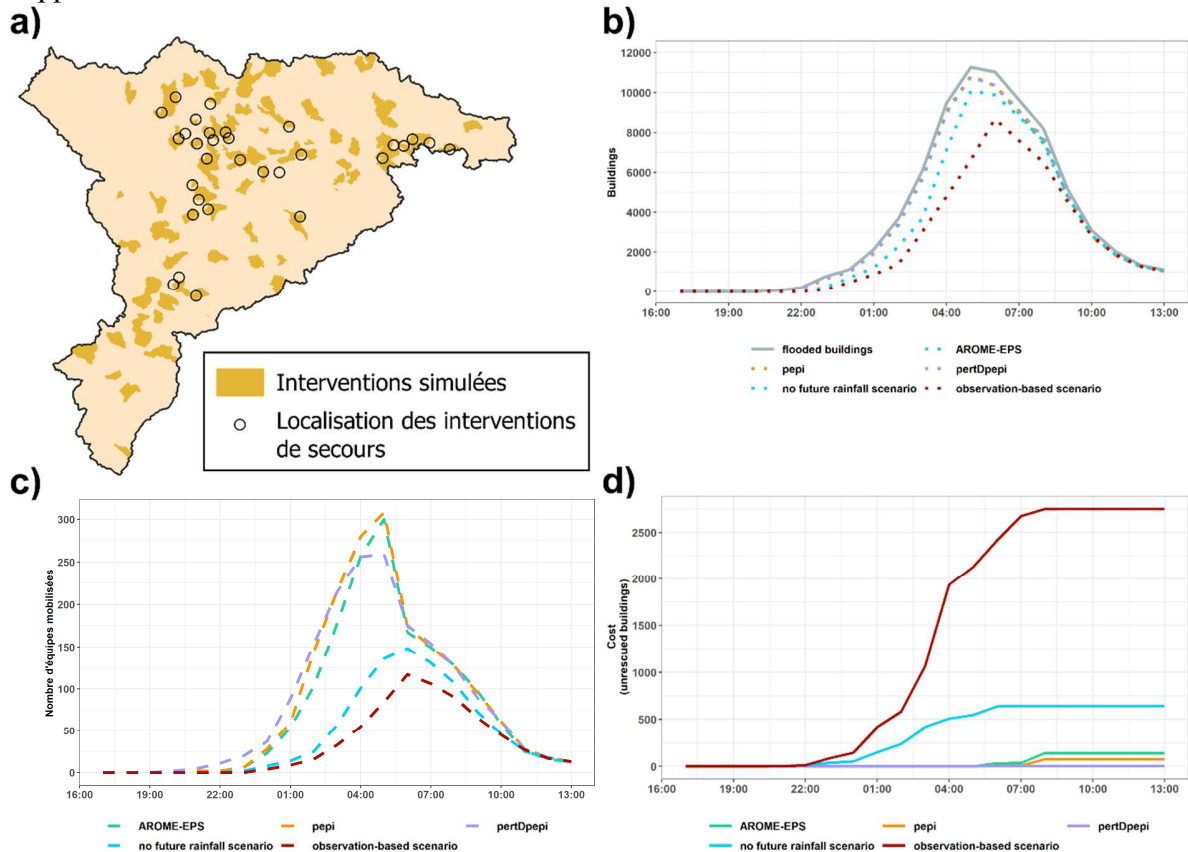


Figure 4 : Illustration des résultats du modèle multi-agent dans un cas de moyens de secours illimités : a) localisation des interventions simulées à partir des prévisions pepi, comparée à celles réellement réalisées, b) évolution du nombre de bâtiments inondés, c) évolution du nombre d’équipes mobilisées et d) fonction de coût : nombre cumulé de bâtiments inondés ne recevant pas une assistance en temps voulu.

5.2. Simulations avec un nombre réaliste d’équipes de secours

La Figure 5 présente les résultats de la simulation multi-agents pour un nombre d’équipes plus réaliste, correspondant aux 92 CCF disponibles sur les 42 centres de secours. Dans tous les cas, le nombre limité d’équipes de secours réduit considérablement le nombre de bâtiments pouvant être secourus (Figure 5.b), ce qui entraîne des coûts largement plus élevés que dans la simulation précédente (moyens illimités), comme le montre la Figure 5.d. L’évolution du nombre d’équipes en opération (Figure 5.c) montre que toutes les équipes de secours sont rapidement envoyées sur le terrain dans le cas de décisions prises à partir des prévisions hydrométéorologiques d’ensemble. A 23h00, toutes les équipes de secours sont déjà mobilisées. Cependant, une proportion importante de ces interventions (26 % des équipes pour pepi) sont déclenchées en raison de fausses alarmes, ce qui représente une perte de temps significative avant une nouvelle affectation et limite les avantages offerts par la meilleure anticipation. Finalement l’évolution de la fonction cout (Figure 5.d) montre que l’utilisation des prévisions pour déclencher des interventions de secours reste plus efficace qu’une décision prise à partir des remontées de

terrain (pluie observée). En revanche, la plus-value des prévisions d’ensemble de pluies s’avère finalement assez limitée, par comparaison aux prévisions basées sur un scénario de pluies futures nulles. Ceci est dû au fait que le scénario de pluies futures nulles n’est pas pénalisé par l’effet des fausses alarmes, ces fausses alarmes provenant des incertitudes sur les prévisions de pluie et de leur propagation via les modélisations hydrologique et hydraulique (Charpentier-Noyer et al., 2023).

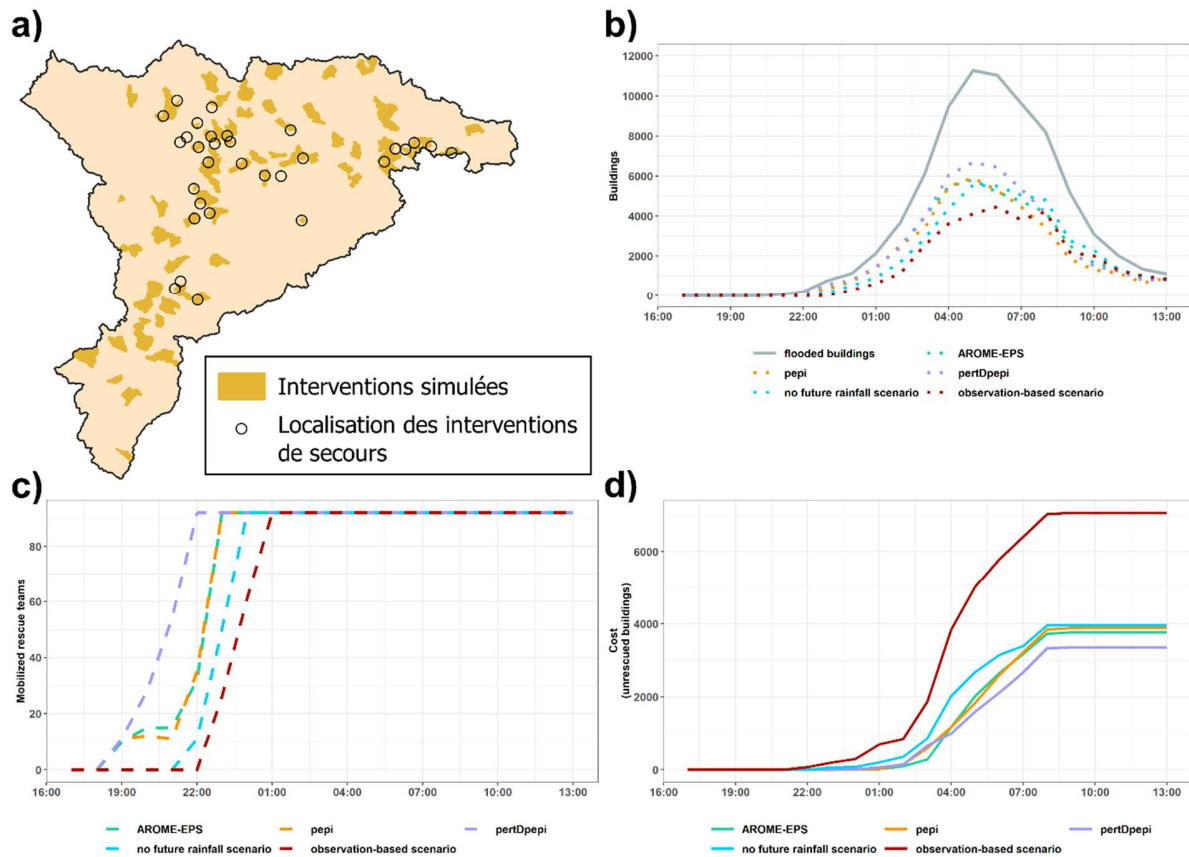


Figure 5 : Illustration des résultats du modèle multi-agent dans un cas réaliste avec 92 équipes de secours : a) localisation des interventions simulées à partir des prévisions pepi, comparée à celles réellement réalisées, b) évolution temporelle du nombre de bâtiments secourus, c) évolution du nombre d’équipes mobilisées et d) fonction de coût : nombre cumulé de bâtiments inondés ne recevant pas une assistance en temps voulu.

6. Discussion et conclusion

Ce travail permet d’illustrer l’intérêt du recours à une modélisation multi-agents, pour évaluer l’intérêt de prévisions hydrométéorologiques ensemblistes dans un processus de prise de décision. En décrivant de façon explicite les décisions et leurs effets, le modèle multi-agents permet de mesurer l’effet combiné d’une meilleure anticipation des crues et de leurs impacts, et de la présence inévitable de fausses alarmes. Ce type de modélisation apporte un éclairage intéressant sur les véritables bénéfices de l’intégration de prévisions des crues incertaines dans les décisions de crise.

Les résultats obtenus ici, qui illustrent le cas particulier des interventions de secours du SDIS de l'Aude lors des crues d'octobre 2018, montrent que le bénéfice des prévisions d'ensemble des impacts des crues dépend fortement des moyens d'interventions disponibles. Des moyens d'intervention limités augmentent en effet considérablement l'effet négatif des fausses alarmes. Les résultats obtenus dans le cas de moyens d'interventions proches de la réalité (92 équipes), montrent néanmoins que l'anticipation offerte par les prévisions d'impacts est susceptible d'améliorer largement l'efficacité des opérations de secours, par rapport à une situation où ces opérations sont déclenchées sur observation de terrain. On notera également que la prévision naïve basée sur une pluie future nulle peut également apporter une plus-value intéressante, car non pénalisée par l'effet des fausses alarmes.

Ces premières conclusions restent à consolider, dans la mesure où un seul événement est examiné ici, et où certaines hypothèses fortes ont été intégrées à la simulation : erreurs de modélisation hydrologique négligées, délais de mise à disposition des prévisions négligés. Par ailleurs, le réalisme de certains paramètres intégrés à la modélisation multi-agents mérite encore d'être confirmé par des échanges avec les services opérationnels : seuil d'intervention, capacité d'intervention d'une équipe, remobilisation possible des équipes de secours à la suite d'une intervention. Même si des compléments restent donc nécessaires pour conclure de façon robuste sur la réelle plus-value apportée par les prévisions, la méthode d'évaluation utilisée ici, basée sur une modélisation multi-agents, semble une voie intéressante à développer pour évaluer de façon efficace l'intérêt de prévisions hydrométéorologiques pour les utilisateurs.

7. Références

- Arnaud, P., Aubert, Y., Organde, D., Cantet, P., Fouchier, C., & Folton, N. (2014). Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation : la méthode SHYREG : présentation – performances – bases de données. *La Houille Blanche*, (2), 20–26. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014012>
- Auger, L., Dupont, O., Hagelin, S., Brousseau, P., & Brovelli, P. (2015). AROME-NWC: A new nowcasting tool based on an operational mesoscale forecasting system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(690), 1603–1611. <https://doi.org/10.1002/qj.2463>
- Barredo, J. I. (2006). Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*, 42(1), 125–148. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2>
- Bouttier, F., Vié, B., Nuissier, O., & Raynaud, L. (2012). Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble. *Monthly Weather Review*, 140(11), 3706–3721. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00031.1>
- CCR. (2018). *Les inondations du 14 et 15 octobre 2018 dans le Languedoc* (No. 11) (pp. 1–5). Caisse Centrale de Réassurance.

- CCR. (2020). *Les catastrophes naturelles en France - Bilan 1982-2019*. Caisse Centrale de Réassurance (CCR). Retrieved from <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/-/bilan-cat-nat-1982-2019>
- Charpentier-Noyer, M., Peredo, D., Fleury, A., Marchal, H., Bouttier, F., Gaume, E., et al. (2023). A methodological framework for the evaluation of short-range flash-flood hydrometeorological forecasts at the event scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(6), 2001–2029. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2001-2023>
- Godet, J., Payrastre, O., Javelle, P., & Bouttier, F. (2023). *Assessing the ability of a new seamless short-range ensemble rainfall product to anticipate flash floods in the French Mediterranean area* (preprint). Hydrological Hazards. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-907>
- Hocini, N., Payrastre, O., Bourgin, F., Gaume, E., Davy, P., Lague, D., et al. (2021). Performance of automated methods for flash flood inundation mapping: a comparison of a digital terrain model (DTM) filling and two hydrodynamic methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 2979–2995. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2979-2021>
- Le Bihan, G., Payrastre, O., Gaume, E., Moncoulon, D., & Pons, F. (2017). The challenge of forecasting impacts of flash floods: test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11), 5911–5928. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5911-2017>
- Naulin, J.-P., Payrastre, O., & Gaume, E. (2013). Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. *Journal of Hydrology*, 486, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.044>
- Nicolle, P., Payrastre, O., & Hocini, N. (2021). *Production d'un catalogue d'emprises inondées mono-fréquence sur les petits cours d'eau de l'arc méditerranéen (rapport d'étape)* (Convention DGPR-Université Gustave Eiffel 2020 n°2201239477 du 8 Juin 2020 - Action 8.1) (p. 14). Université Gustave Eiffel.
- Osinski, R., & Bouttier, F. (2018). Short-range probabilistic forecasting of convective risks for aviation based on a lagged-average-forecast ensemble approach. *Meteorological Applications*, 25(1), 105–118. <https://doi.org/10.1002/met.1674>
- Petrucci, O., Aceto, L., Bianchi, C., Bigot, V., Brázdil, R., Pereira, S., et al. (2019). Flood Fatalities in Europe, 1980–2018: Variability, Features, and Lessons to Learn. *Water*, 11(8), 1682. <https://doi.org/10.3390/w11081682>
- Raynaud, L., & Bouttier, F. (2016). Comparison of initial perturbation methods for ensemble prediction at convective scale. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(695), 854–866. <https://doi.org/10.1002/qj.2686>
- Vincendon, B., Ducrocq, V., Nuissier, O., & Vié, B. (2011). Perturbation of convection-permitting NWP forecasts for flash-flood ensemble forecasting. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1529–1544. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1529-2011>