



HAL
open science

Quels enseignements tirer des coulées de débris post-incendie survenues le 9 janvier 2018 à Montecito (Californie, USA) ?

Johnny Douvinet, Anna Serra-Llobet, John Radke, Matthias Kondolf

► To cite this version:

Johnny Douvinet, Anna Serra-Llobet, John Radke, Matthias Kondolf. Quels enseignements tirer des coulées de débris post-incendie survenues le 9 janvier 2018 à Montecito (Californie, USA) ? . La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2021, 10.1051/lhb/2020052 . hal-03160395

HAL Id: hal-03160395

<https://hal.science/hal-03160395>

Submitted on 5 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Quels enseignements tirer des coulées de débris post-incendie survenues le 9 janvier 2018 à Montecito (Californie, USA) ?[☆]

Johnny Douvinet^{1,*}, Anna Serra-Llobet², John Radke^{3,*} et Matthias Kondolf⁴

¹ Avignon Université/UMR ESPACE 7300 CNRS, 74 rue Louis Pasteur, Case 19, 84029 Avignon Cedex 9, France

² Institute of International Studies, University of California Berkeley, 94701 City, USA

³ Department of Landscape Architecture & Environmental Planning, City and Regional planning, University of California Berkeley, City, Country

⁴ Global Metropolitan Studies, University of California Berkeley, City, Country

Reçu le 1 novembre 2020 / Accepté le 13 novembre 2020

Résumé – Le 9 janvier 2018, à Montecito (Comté de Santa-Barbara, État de Californie, États-Unis), de violentes coulées de débris sont apparues vers 4 h du matin, suite à une intensité pluviométrique remarquable (13 mm en 5 minutes, soit une intensité horaire de 157 mm/h). Ces coulées, constituées de blocs, de boue et de branches d'arbres, ont pu déposer, par endroits, une accumulation solide de plus de 5 m. et les vitesses d'écoulements auraient dépassé 30 km/h (soit plus de 8 m/s). Le bilan humain et matériel est lourd : 21 morts ; 2 personnes disparues ; 167 blessés ; 408 maisons endommagées ; un coût estimé à plus de 167 millions de dollars. Cet événement est en réalité apparu 3 semaines après le passage du pire incendie qu'ait connu la Californie au cours du dernier siècle (Thomas Fire). De tels aléas (*i.e.* « post-fire debris flows ») résultent d'interactions entre les variables de prédisposition (la nature des sols, les zones brûlées, l'humidité, l'hydrophobie, les pentes) et les forçages climatiques (l'intensité des pluies), et ils ne sont pas nouveaux : la sensibilité des bassins amont de Montecito avait bien été identifiée la veille (avec un risque de crue estimé à 68 %). Des évacuations avaient aussi été ordonnées dès la veille (plus de 10 000 personnes). Ainsi, quelles leçons tirer de cet événement, et quelles sont les pistes d'amélioration envisager pour réduire leurs impacts à l'avenir ?

Mots clés : coulées de débris / incendie / Montecito / modèles de prévision

Abstract – **The 2018 Montecito post-fire mudflows: an (im)foreseeable event.** Early on the morning of 9 January 2018, a rain characterized by a sudden intensity (13 mm in 5 min, *e.g.* 157 mm/h) at 3.45 a.m. (recorded by the Montecito rain gauge) cause flows consisting of mud, boulders and tree branches up to 15 feet (5 m) in height, and moving at estimated speeds of up to 20 miles per hour (30 km/h). Damage was remarkable: 21 dead and 2 missing; 167 injured; 408 houses damaged; estimated cost over \$167 million. This event occurred mostly less than 20 days after the worst fire in California in the last century (Thomas Fire). Such phenomena (post-fire debris flows) result of complex interactions between predisposition variables (soil type, burnt areas, humidity, hydrophobicity, slopes...) and climatic forcing (rainfall intensity), and the sensitivity of the Montecito upstream basins had been well identified (with a probable flood risk estimated at 68%). Mass evacuations had also been ordered the day before. So, what can we learn about this phenomenon, could it possible to do “better”, and is it possible to reduce the number of victims in short term?

Keywords: debris flows / post-fire / Montecito / forecasting tools / runoff management

[☆] Colloque SHF : « Ruissellement, Lyon 30 nov–2 déc 2020 »

Douvinet, Serra-Llobet, Kondolf, Radke–La coulée de Montecito : un événement (im)prévisible ?

*Correspondance : johnny.douvinet@univ-avignon.fr

1 Introduction

Les coulées de débris post-incendie sont des aléas capables de transporter de grands volumes de sédiments et des blocs sur plusieurs centaines de mètres, ce qui les rend destructeurs et dangereux (Coe *et al.*, 2014 ; Takahashi, 2007 ; Cannon *et al.*, 2010). Ces aléas se produisent lorsque des ruissellements consécutifs à des pluies intenses arrachent aux versants pentus les sols, des cailloux et des roches (Coussot et Meunier, 1996 ; Santi *et al.*, 2008). Immédiatement après un incendie, le ruissellement joue un rôle plus exacerbé, grâce à la mise à nu des sols et la perte en végétation (Wondzell et King, 2003 ; Parise et Cannon, 2012), mais également par les modifications induites dans les propriétés du sol et par les excès sédimentaires (Meyer et Wells, 1997 ; Nyman *et al.*, 2011 ; Moody et Ebel, 2012). À la fin des années 1990, Meyer et Wells (1997) avaient démontré que le ruissellement commençait dès le début des premières pentes (1 %). Il converge et se concentre le long des drains de rang 2, si on se fonde sur la méthode d'ordination de Strahler (1957). Le ruissellement concentré entraîne alors une érosion marquée qui peut aller jusqu'au substratum rocheux et le transport des matériaux se poursuit vers le bas de pente. Plus récemment, Cannon (2001) et Cannon *et al.* (2008, 2010) ont démontré que la transition vers la coulée de débris se produit lorsque suffisamment de matériaux ont été entraînés, par rapport au volume du ruissellement, pour conférer aux flux des caractéristiques de coulée (Coussot et Meunier, 1996). Les dépôts ne présentent pas de granulo-classement. Ces coulées, qui débutent souvent par des glissements superficiels, acquièrent en quelques dizaines de mètres des caractéristiques d'écoulement.

Anticiper de tels événements est toutefois complexe. La prévision se fonde sur plusieurs facteurs, notamment l'intensité des feux, l'ampleur des zones brûlées, la nature des pluies arrivant après l'incendie et des paramètres géomorphologiques et hydrologiques inhérentes aux bassins versants touchés par les incendies (Nyman *et al.*, 2011). Les coulées de débris ou les inondations chargées de sédiments sont souvent produites dans des bassins brûlés de petite taille (< 20 km²), en réponse à des orages convectifs de très courte durée dans les régions montagneuses de l'ouest des États-Unis (Parrett, 1987 ; Meyer et Wells, 1997 ; Cannon et Gartner, 2005), ou suite à des tempêtes hivernales de plus longue durée au sud de la Californie (Booker, 1998). Mais les seuils ne sont pas si précis : en Californie du Sud, le seuil est défini sur des durées de 20 heures (Cannon *et al.*, 2010), et pourtant, cela englobe une grande diversité de conditions, qui peuvent varier de 25 mm/h pendant 10 min à une pluie moyenne de 4 mm/h pendant 20 h. La reprise de la végétation ou le transport des matériaux accumulés dans les pentes pendant le ruissellement peuvent aussi affecter les réactions hydrologiques. Par conséquent, ces événements ne sont pas si faciles à anticiper. Ils peuvent se produire avec peu, voire sans aucune humidité préalable. Aussi, malgré le danger que ces aléas représentent (Stock et Dietrich, 2006), les efforts doivent se poursuivre, en particulier pour effectuer des mesures empiriques, car ces aléas se produisent peu fréquemment et sont difficiles à quantifier avec précision (Kean *et al.*, 2011 ; Takahashi, 2007).

Il convient donc d'améliorer les connaissances sur ces phénomènes (qui ne sont pas nouveaux), et sur les « seuils

critiques », qui peuvent servir de guide pour les systèmes d'alerte et la planification des interventions d'urgence en cas de ruissellement important dans des contextes ayant des caractéristiques similaires. En comparant les prévisions de précipitations et les gammes de mesures effectuées sur les aléas passés, il est possible de prendre des décisions en matière d'alerte et d'évacuation. Quand une combinaison d'intensité et de durée des pluies approche ou dépasse la ligne de seuil, des coulées de débris et des inondations présentant des risques importants pour les personnes et les biens deviennent probables. D'ailleurs, les seuils définis dans le cadre de la Californie du Sud sont utilisés comme guide pour le système d'alerte précoce de démonstration NOAA-USGS sur les crues éclairs et les coulées de débris en Californie du Sud (Cannon *et al.*, 2008) et ils ont été utilisés dès le début du mois de janvier 2018...

2 Présentation du site d'étude

Situé à 8 km à l'est de la ville de Santa Barbara, en Californie (Fig. 1), Montecito est une communauté où habitent 9145 habitants en 2018. Cette ville est régulièrement classée par le magazine *Forbes* comme l'une des plus riches des États-Unis (selon le magazine, 21 des 100 personnalités publiques les plus influentes des États-Unis sont connues pour posséder des biens à Montecito en 2017). Le climat se caractérise par des hivers plus chauds et des étés plus frais, par rapport aux endroits situés plus à l'intérieur des terres, en raison de la proximité de l'océan (Ciu *et al.*, 2019). La ville de Montecito s'est développée au pied des montagnes de Santa Ynez, de nature sédimentaire, et le pic d'altitude atteint 1161 m. Suivant une direction nord/sud, cinq cours d'eau principaux drainent le massif (Fig. 1) sur de courtes distances (< 3 km), avant de se raccorder à l'Océan Pacifique au sud. Dans ces conditions, le terrain, escarpé, présente des pentes importantes : ~ 37 % du massif dépasse des pentes > 30 %, et la pente de la ligne d'eau dépasse en moyenne les ~ 12 % (Kean *et al.*, 2019). Les ruissellements de surface s'écoulent dans un ensemble de ruisseaux présentant des gradients d'environ 5 %, et ils ré-incident des cônes alluviaux hérités des périodes quaternaires. La plaine urbanisée contient des formes de relief en pente marquée, en particulier au nord de la route nationale 192 et de la route 101, et des formes de relief en pente douce, sur les cônes alluviaux et près de la côte (Kean *et al.*, 2019). Pour protéger la forte densité de routes et les habitations, 4 bassins de rétention des sédiments ont été construits dans le passé : sur les drains amont de Cold Spring et San Ysidro (en 1964), de Romero (1971) et de Montecito (2002).

Avant l'événement de 2018, Montecito avait déjà connu des coulées de débris post-incendie (Kean *et al.*, 2019). Des coulées historiques dommageables (1926, 1934, 1964, 1969, 1971) avaient déjà été enregistrées dans cette zone (WERT, 2018), et ce sont les coulées de 1934 (dramatique à Montrose, 40 personnes tuées) qui d'ailleurs ont abouti aux premières recherches scientifiques dans le domaine (Keller *et al.*, 2019). Suite au gigantesque incendie *Thomas Fire* fin 2017, le risque de coulée de débris a été pris au sérieux par les agences du comté, de l'état et les agences fédérales, en témoignant : (1) la caractérisation de la gravité des brûlures du sol comme indicateur d'inondation et de potentiel de coulée de débris

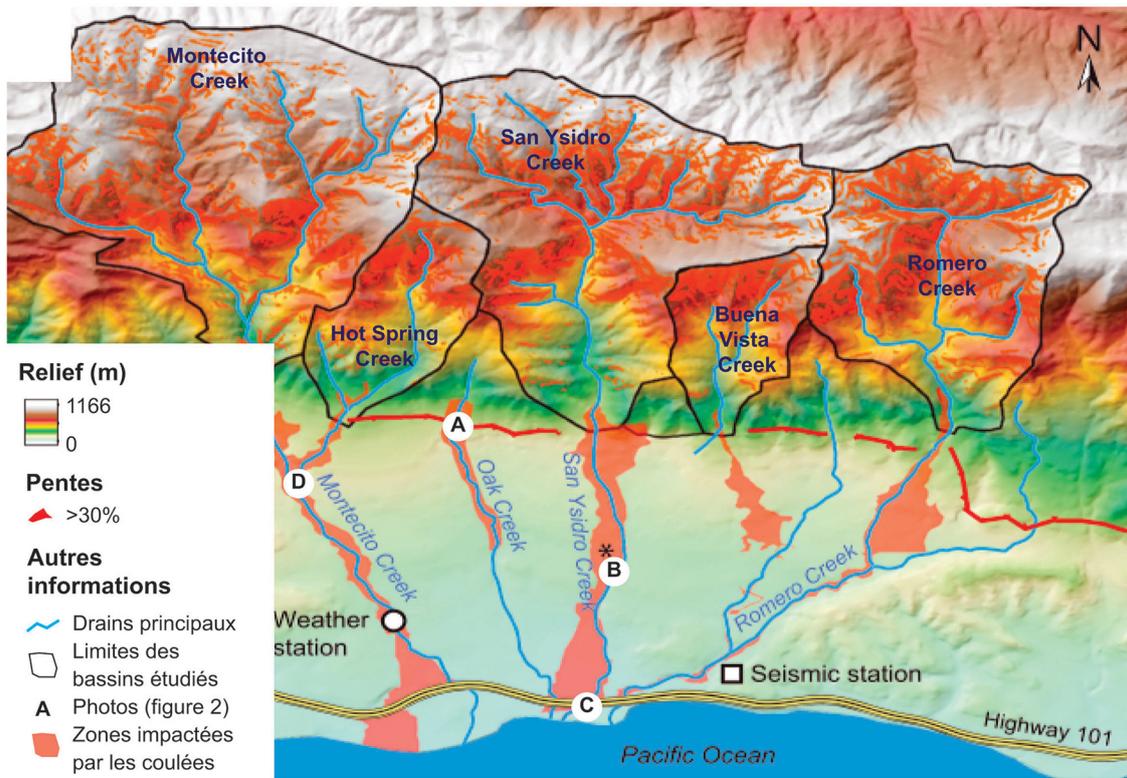


Fig. 1. Carte de localisation des bassins étudiés au nord de Montecito (modifié d'après Ciu *et al.*, 2019).

Tableau 1. Caractéristiques des bassins et probabilité d'occurrence d'une coulée (pour $I_{max} = 24$ mm/h).

Nom des bassins versants (numéro)	Surface des bassins (km ²)	Pentes moyennes (percentile 50 et 90)	Surfaces brûlées (indice fort à très fort) (%)	Probabilité d'occurrence d'une coulée de débris (%)
Montecito Creek (1)	9,35	28 / 39	79	65
Hot Spring Creek (2)	1,47	28 / 40	49	70
San Ysidro Creek (3)	7,60	28 / 40	85	69
Buena Vista Creek (4)	1,67	29 / 41	82	63
Romero Creek (5)	4,59	30 / 42	78	62

(BAER, 2018) ; (2) une évaluation des risques de coulée de débris montrant la probabilité et le volume potentiel des coulées de débris de la zone brûlée en réponse à des épisodes intenses (U.S. Geological Survey, 2018) ; (3) l'activation du système d'alerte qui prédit un potentiel important à extrême de coulée de débris, qui a été diffusée 4 jours avant le 9 janvier 2018 (Restrepo *et al.*, 2008 ; NWS, 2018). Une communauté d'urgence proactive a aussi coordonné des ordres d'évacuation à grande échelle, ce qui a probablement réduit le nombre de victimes (Kean *et al.*, 2019). Toutefois, malgré ces efforts, il a été difficile d'anticiper cet événement : (1) avant les pluies du 9 janvier 2018, l'U.S. Geological Survey (2018) prévoyait une probabilité de 62 à 70 % de coulées de débris sur les 5 bassins versants situés en amont du Montecito (Tab. 1), pour une intensité horaire supérieure à 24 mm/h (Bessette-Kirton *et al.*, 2019) ; (2) la prévision d'une telle intensité reste difficile en temps réel, d'autant qu'une

seule station existe au sein des montagnes de Santa Ynez ; (3) vu l'ampleur de l'incendie et la situation convective en place la veille, un grand nombre de bassins était prêt à réagir sur l'ensemble de la Californie du Sud. Par précaution, la ville a toutefois fait évacuer plus de 10 000 personnes la veille, eu égard à la situation orageuse à venir, ce qui fut aussi le cas lors des épisodes précédemment prévus (ce fut la 3^e évacuation depuis le 20 décembre).

3 Chronologie et impacts de la crue du 9 janvier 2018

Du 16 au 17 décembre 2017, l'incendie *Thomas Fire* a affecté la quasi-totalité des bassins amont, et le feu a atteint les premières maisons des cônes alluviaux (Kean *et al.*, 2019). Dans ces conditions, le risque lié à des coulées de débris était

Tableau 2. Caractéristiques des coulées survenues le 9 janvier 2018 (d'après [Kean *et al.*, 2019](#)).

Nom des bassins versants (numéro)	Surface des bassins (km ²)	Surfaces inondées (km ²)	Volume sédimentaire (m ³)
Montecito Creek (1)	9,35	0,997	231 000
Hot Spring Creek (2)	1,47	0,102	10 000
San Ysidro Creek (3)	7,60	0,905	297 000
Buena Vista Creek (4)	1,67	0,290	41 000
Romero Creek (5)	4,59	0,312	100 000

redouté et les pluies étaient très surveillées ([Bessette-Kirton *et al.*, 2019](#)). Le 4 janvier, plusieurs bulletins météorologiques, relayés dans les médias, ont annoncé un nouvel épisode pluvieux à venir dans la nuit. L'épisode frontal, arrivant par l'ouest et s'étalant sur plus de 200 km à 1 h du matin, s'est disloqué en plusieurs cellules convectives bloquées par effet orographique ([Oakley *et al.*, 2018](#)). En amont de Montecito, un orage, aussi soudain que violent, a entraîné une courte intensité de pluies (13 mm en 5 min, soit une intensité horaire équivalente de 157 mm/h), de 3 h 40 à 3 h 45 (enregistrée par le pluviomètre du Montecito), et en réaction, des coulées, constituées de blocs et de branches ont atteint par endroits plus de ~ 5 m de hauteur d'accumulation à Montecito ([Tab. 2](#)). Les vitesses d'écoulement maximum ont été estimées à plus de ~ 8 m/s (soit ~ 30 km/h) au niveau des confluences et à l'exutoire du piémont ([Hamilton et Serna, 2018](#)). À 3 h 47 du matin, le service d'incendie du Montecito a reçu les premiers appels, indiquant une explosion sur San Ysidro Creek-East Mountain Drive ([Kean *et al.*, 2019](#)). Les réponses hydrologiques ont été très soudaines, puisque la Cold Spring a commencé à réagir à 3 h 49 du matin (ce qui a été confirmé par les images des caméras de sécurité) et les inondations ont commencé dans les autres secteurs urbanisés à 3 h 50 ([Kean *et al.*, 2019](#)). Les réponses estimées à l'aide des signatures sismologiques varient entre 4 h 06 et 4 h 10 ([Lai *et al.*, 2018](#)) ([Fig. 2](#)).

Les écoulements, arrivant soudainement, ont piégé plusieurs dizaines de personnes, et 163 personnes se sont présentés dans les hôpitaux pour diverses blessures. Un examen rétroactif effectué sur 24 victimes des coulées de débris se présentant à *Cottage Health* a montré que la plupart des symptômes étaient associés à des blessures légères (100 %), à une hypothermie (67 %), à des blessures cranio-faciales (67 %), à des abrasions de la cornée (53 %), à des blessures orthopédiques (47 %), ou à des impacts psychologiques liés à la perte d'un membre de la famille (73 %) ([Langdon *et al.*, 2019](#)). 21 personnes sont décédées, et 2 enfants (de 2 et 17 ans) sont portés disparus. 10 victimes (sur 21) étaient des migrants issus de la classe ouvrière ([Keller *et al.*, 2019](#)). Les services de secours ont toutefois « sauvé d'une mort certaine » plus de 50 personnes (évacuées par avions) et 300 personnes sont restées bloquées pendant plusieurs minutes dans le quartier de Romero Canyon, suite à la coupure de la route 192. Fin 2018, les indemnités associées à cet événement ont été évaluées à 7 millions de dollars, pour les interventions d'urgence, et à 43 millions de dollars pour les opérations de nettoyage ([Robert et Niehaus, 2018](#); [Magnoli, 2018](#)), pour un coût global qui dépasse les 250 millions de dollars en 2019.

4 Un alea « hors-norme » ?

La violence des écoulements et la soudaineté des réponses hydrologiques confèrent un caractère particulier à cet aléa. Menées juste après l'événement, plusieurs études en confirment toutefois la singularité. En créant un modèle de probabilité d'occurrence, et en combinant l'indice hypsométrique (HI), les intensités des pluies et la gravité des zones brûlées, [Ciu *et al.* \(2019\)](#) confirment la très forte sensibilité aux coulées de débris des bassins amont, pour des seuils proches à 10 mm/h (et non 24 mm/h, qui est le seuil utilisé sur l'ensemble de la Californie du Sud). De façon complémentaire, [Keller *et al.* \(2019\)](#) et [Kean *et al.* \(2019\)](#) ont prouvé que les cartes utilisées (et communiquées) par la FEMA sous-estimaient largement la zone inondable, et une nouvelle carte (adoptée fin 2019) devrait permettre de mieux évaluer les dommages aux bâtiments. La prise en compte du risque est par ailleurs spécifique aux États-Unis : les individus prennent la responsabilité d'habiter en zone inondable (en lit moyen ou majeur), et c'est à eux de se protéger et de souscrire à une assurance ; autrement dit, ils assument la prise de risque et leur sécurité. De leur côté, [Bessette-Kirton *et al.* \(2019\)](#) confirment que les coulées survenues en 2018 à Montecito sont « classiques » : en utilisant deux modèles différents (à savoir, LAHARZ et FLO-2D), ils arrivent à reproduire 85 % des surfaces inondées en 2018, la différence étant liée au phénomène de blocage survenu en amont de la route 192 (qui a augmenté la rétention en amont).

Pour compléter ces travaux, nous avons utilisé un modèle déterministe, RuiCells[®], pour évaluer l'influence de l'organisation morphologique interne des bassins versants sur leur dynamique hydrologique, en amont des cônes alluviaux urbanisés. Ce modèle n'a pas vocation à reproduire l'événement : il s'agit ici de confirmer le rôle de la morphométrie dans la genèse des écoulements, et de mesurer le poids des interactions entre l'intensité des pluies, les surfaces brûlées et les réponses simulées, en choisissant des conditions initiales identiques (qui tiennent compte de la nature des sols, du relief et de la végétation). Ce modèle peut également être utilisé ici car les montagnes de Santa Ynez sont d'origine sédimentaire, les écoulements de surface ont été prépondérants, et plusieurs travaux ont déjà démontré que les paramètres morphométriques étaient de bons indicateurs pour caractériser les zones exposées aux coulées de débris ([Pareschi *et al.*, 2000](#), [Ciu *et al.*, 2019](#); [Keller *et al.*, 2019](#)). En d'autres termes, nous voulons quantifier le rôle joué par les incendies qui ont, en réduisant la capacité d'infiltration et la porosité des sols à son paroxysme, fortement aggravé les ruissellements de surface.

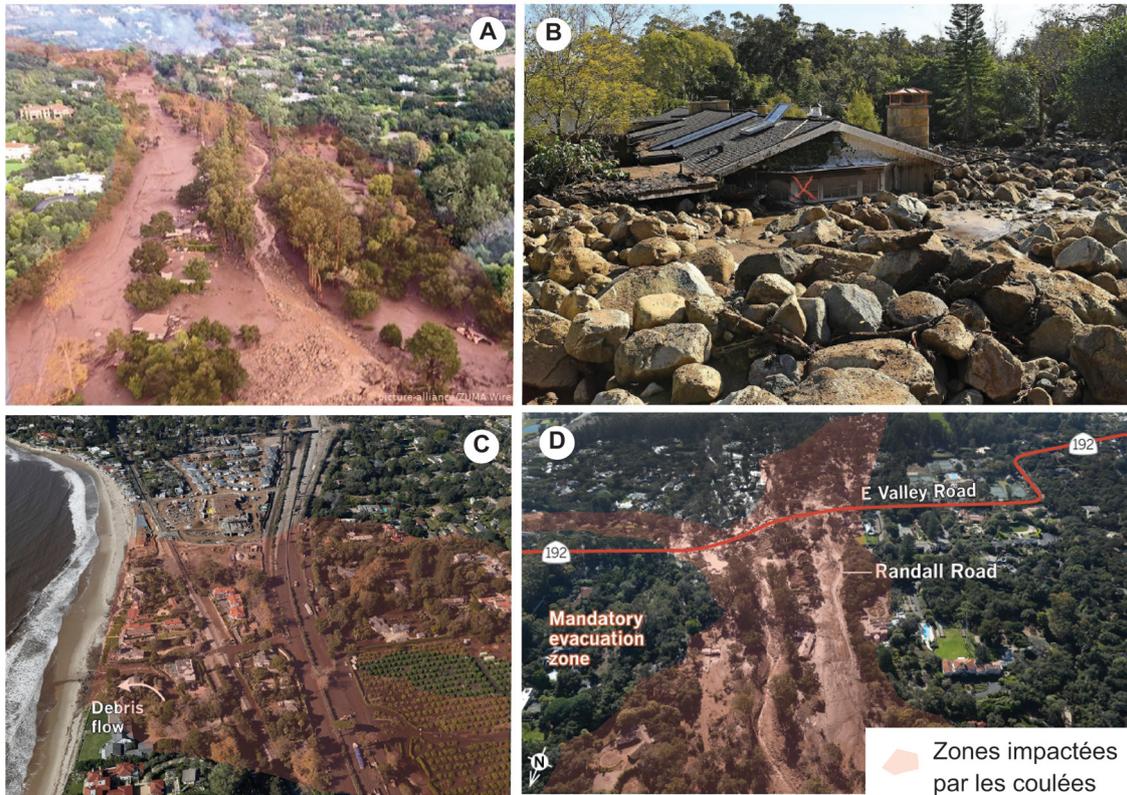


Fig. 2. Photographies illustrant l'ampleur des dégâts recensés à Montecito (localisation sur la Fig. 1).

Dans un premier temps, des simulations 2D (réseaux/surface) ont permis de mettre en avant le comportement spatial théorique des bassins versants, en se focalisant sur la relation qui existe entre les réseaux et les versants, qui renseigne sur les mécanismes de développement de ces réseaux au sein d'une forme donnée. Un Indice de Concentration (IC) est calculé avec RucCells[®], pour mettre en évidence tous les points en amont desquels « les surfaces et les réseaux sont structurellement efficaces et bien organisés » (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997). Cet indice IC rapporte le débit maximum théorique de surface (Q_{max}) – le pic du cumul des surfaces situées à égale distance d'un exutoire en amont (Douvinet *et al.*, 2008). Q_{max} étant rapporté à une longueur (puisque la racine carrée équivaut au diamètre moyen de la surface amont), l'indice IC est adimensionnel, et il peut être spatialisé en tout point de l'espace. Les valeurs très élevées (en rouge) identifient donc les points névralgiques à l'intérieur du bassin et où le réseau est très efficace vis-à-vis de la forme dans laquelle il s'insère. Des résultats antérieurs (Douvinet *et al.*, 2008, 2014) avaient prouvé les bonnes relations entre des valeurs élevées (supérieures à 55 avec un MNA de 50 m de long) et des impacts géomorphologiques (comme l'érosion et les ravines dans les vallées et les canaux secs). Ici, un effet « chou-fleur » est à nouveau observé au sein des 4 bassins versants, en particulier au sein de Romero Creek, et surtout au sein des bassins de San Ysidro et Montecito. L'efficacité interne (marquée au sein de San Ysidro, la valeur simulée étant d'ailleurs la plus forte jamais

simulée sur plus de 450 bassins versants...) peut aussi se répéter à travers les échelles : c'est une homothétie interne (que l'on visualise très bien sur Montecito Creek) (Fig. 3).

Dans un deuxième temps, des simulations 3D ont été réalisées sur chacun des 5 bassins versants étudiés. Le but était de mesurer le rôle joué par les effets d'interactions entre les caractéristiques des pluies et la localisation des surfaces brûlées, en lien avec l'efficacité morphologique précédemment avérée. Pour atteindre cet objectif, nous avons considéré, comme données d'entrées initiales, la nature des sols (cartographie fournie par l'USGS), le relief (avec le MNT avec une résolution de 50 m. pour réduire le délai des simulations), et l'occupation du sol (carte de 2016). Différentes simulations ont ensuite été réalisées (Tab. 3), en jouant soit sur la pluie (en utilisant deux intensités, celle du 13 janvier 2017, avec une intensité pluviométrique maximale de 8 mm en 30 minutes, et celle du 9 janvier 2018), soit sur la localisation des surfaces brûlées (jusqu'à atteindre la situation du 9 janvier 2018), de façon à mesurer le rôle de chaque variable, de façon séparée puis combinée (Tab. 3).

Le poids des interactions est remarquable : l'intensité des pluies a joué un rôle infime dans l'augmentation théorique des débits et des volumes de ruissellement ($\times 1,4$ à $\times 1,86$ si on compare, à situation égale, les pluies de 2017 et de 2018). En injectant les pluies de 2018, et en jouant sur l'ampleur des zones brûlées (variant de 0% – situation initiale – à 49%, et allant jusqu'à 85% ; scénarios 2b et 3b), on estime que l'incendie et les pluies ont, de façon combinée, contribué à augmenter les débits de pointe (Fig. 4) dans des ordres de

311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339

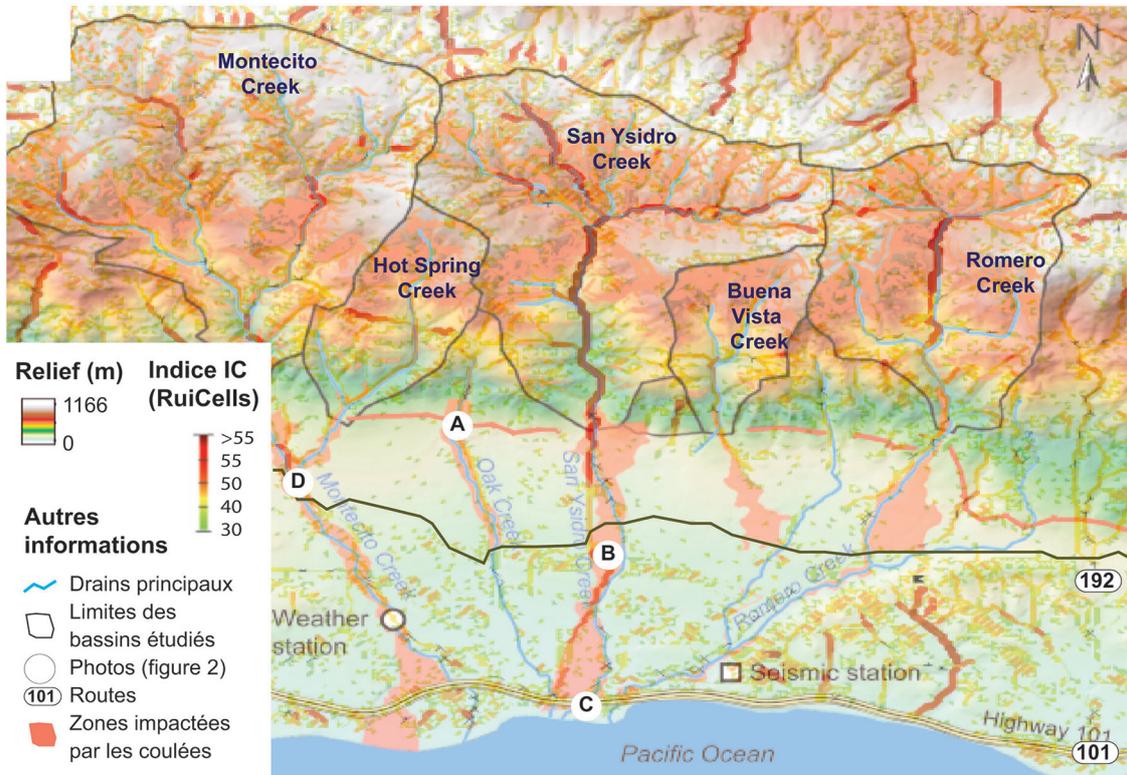


Fig. 3. Cartographie de l'Indice de Concentration des écoulements de surface (potentiel théorique) par rapport à la localisation des zones impactées par les coulées de débris.

Tableau 3. Combinaisons retenues pour les simulations sur les 5 bassins versants.

Simulations	Surfaces brûlées en 2018	Surfaces non brûlées	Pluie 2017	Pluies 2018
S1a	/	/	X	/
S1b	/	/	/	X
S2a	/	X	X	/
S2b	/	X	/	X
S3a	X	/	X	/
S3b	X	/	/	X

grandeur de $\times 6,25$ sur Hot Spring Creek, et jusqu'à $\times 10,24$ sur San Ysidro Creek. Les volumes ruisselés auraient augmenté dans des ordres de grandeur allant de $\times 7,21$ à $\times 8,72$. Les volumes simulés sont théoriques, et ils ne peuvent traduire la réalité car la composition en matériaux et en éléments solides rend délicate de telles évaluations. En revanche, les ordres de comparaison sont intéressants (Tab. 4). Sur 3 bassins (Montecito, San Ysidro et Buena Vista Creek), le ratio Volume Sédimentaire (V_s)/Volumés ruisselés (V_r) simulés indique des valeurs qui dépassent les 60 % (ce qui confirme l'existence de véritables laves torrentielles aux exutoires, en particulier à la confluence amont de Montecito Creek), tandis que les valeurs sont plus faibles pour Hot Spring Creek (35 %) et Romero Creek (40 %). En tous cas, le volume global estimé avec RuiCells© (qui atteint $379\,202\text{ m}^3$ sur les 5 bassins) est relativement proche des estimations des

valeurs avancées peu de temps après l'évènement (notamment sur le volume écoulé, estimé à $390\,000\text{ m}^3$ sur les 5 bassins par Kean *et al.*, 2019).

5 Quels efforts poursuivre pour améliorer les prévisions ?

Comme indiqué précédemment, les services en charge de la prévision et de la surveillance des coulées de débris (USGS, FEMA) ont mis en vigilance la population face aux coulées de débris. Les médias ont, dès le 4 janvier 2018, fait plusieurs annonces de vigilance dans la presse, et les services de secours ont procédé à de multiples évacuations. Suite à un séminaire réunissant des acteurs opérationnels et des scientifiques (2 février 2020), d'autres constats ont été mis à jour, et plusieurs pistes d'amélioration ont été proposées :

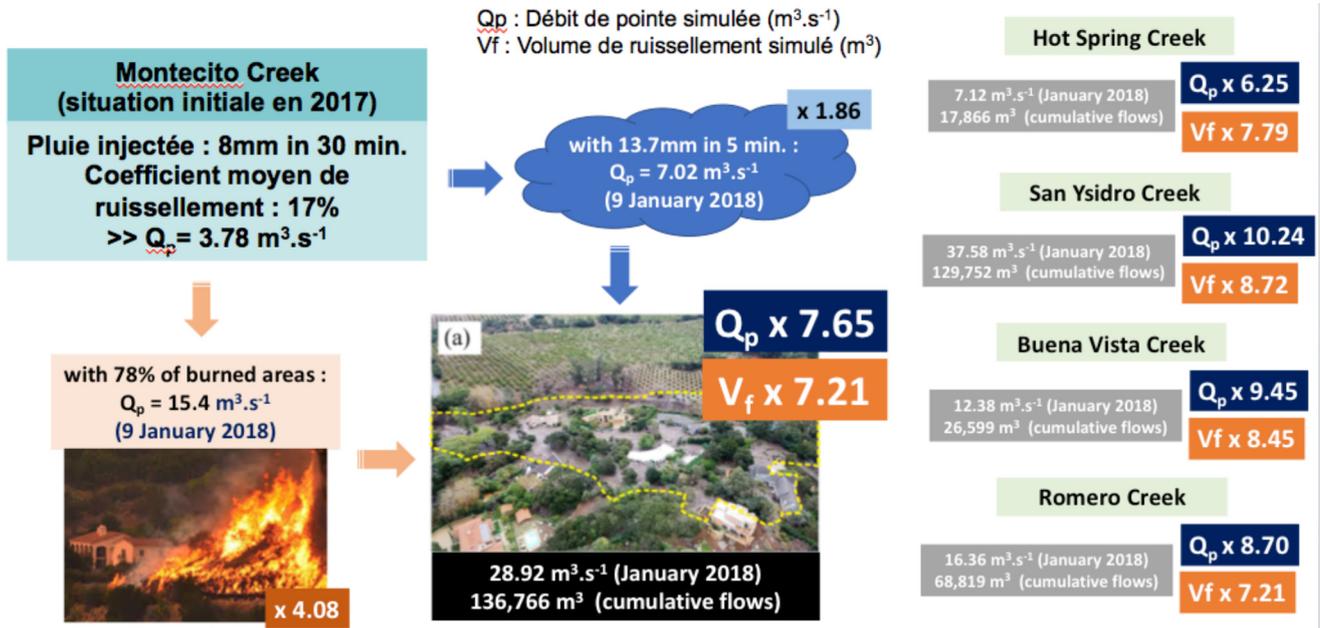


Fig. 4. Rôle joué par les interactions entre l'incendie et les intensités des pluies en 2018 (en considérant la situation initiale de 2017).

Tableau 4. Comparaison entre le volume sédimentaire et les volumes ruisselés simulés.

Nom des bassins versants (numéro)	Surface (km ²)	Vs: Volume sédimentaire (m ³)	Vr: Volumes ruisselés simulés (m ³)	Vt: Volume total simulé (m ³)	Ratio Vs/Vt (%)
Montecito Creek (1)	9,35	231 000	136 766	367 766	62,8
Hot Spring Creek (2)	1,47	10 000	17 866	17 866	35,8
San Ysidro Creek (3)	7,60	297 000	129 752	426 752	69,5
Buena Vista Creek (4)	1,67	41 000	26 599	26 599	60,1
Romero Creek (5)	4,59	100 000	68 219	168 219	40,4

370 – la capacité des modèles à prévoir le comportement du feu
 371 en fonction du type de végétation, de l'humidité de la
 372 végétation, des conditions météorologiques, de la topo-
 373 graphie, etc., est robuste, tout comme les modèles de
 374 prédiction des coulées de débris (MUDFLOW, LAHARZ
 375 ou FLO-2D). L'occurrence des coulées de débris à
 376 Montecito en 2018 n'a pas été une surprise, mais l'ampleur
 377 et les impacts de l'inondation l'ont été puisque les pluies ont
 378 été 3 à 4 fois plus intenses que prévues. Le défi est donc
 379 d'améliorer les prévisions météorologiques, de mieux
 380 anticiper les réactions soudaines d'un grand nombre de
 381 bassins ayant brûlé lors d'un incendie aussi gigantesque que
 382 celui de *Thomas Fire*, et de mutualiser les savoirs dans un
 383 temps aussi court ;
 384 – différentes cartes identifiant le risque existaient aupa-
 385 ravant. Toutefois, elles n'ont pas été utilisées de façon
 386 « optimale ». De façon surprenante (Fig. 5), les évacuations
 387 ont été organisées en prenant en compte le risque incendie
 388 (avec une évacuation obligatoire dans les zones situées au
 389 nord de Montecito – figure 2D – tandis que l'évacuation
 390 était facultative au sud), alors que les coulées de débris
 391 suivent une logique verticale (du nord au sud). Aussi, des

riverains situés dans les zones à risque n'ont jamais reçu
 l'ordre d'évacuer, et ils ont été surpris en pleine nuit par un
 mur d'eau (à l'image de cette vidéo d'un riverain circulant
 sur YouTube¹). Il faudra, par la suite, combiner toutes ces
 cartographies, les normaliser à l'aide d'une nomenclature
 commune, et mettre à disposition ces savoirs à destination
 des décideurs et des acteurs opérationnels ;
 – du côté scientifique, différents modèles sont utilisés à des
 fins expérimentales, mais ils ne sont pas toujours
 implémentés dans la planification. Avant le 9 janvier 2018,
 les moyens de secours ont été pré-positionnés selon la carte
 des zones inondables préétablie par la FEMA, mais elle
 sous-estimait très largement les zones à risque². Si les
 responsables des opérations ont eu la chance d'avoir
 l'expérience et les connaissances nécessaires pour envisa-
 ger le risque et prendre des mesures, le défi consiste alors à
 transmettre les savoirs experts aux décideurs. Il faut aussi
 combiner les méthodes et les approches : chaque outil est

¹ https://www.youtube.com/watch?v=dDSAwm1nf_c.

² <https://sbc-gis.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=469ab8e3057a4f56aee5e3f080dc7fb1>.

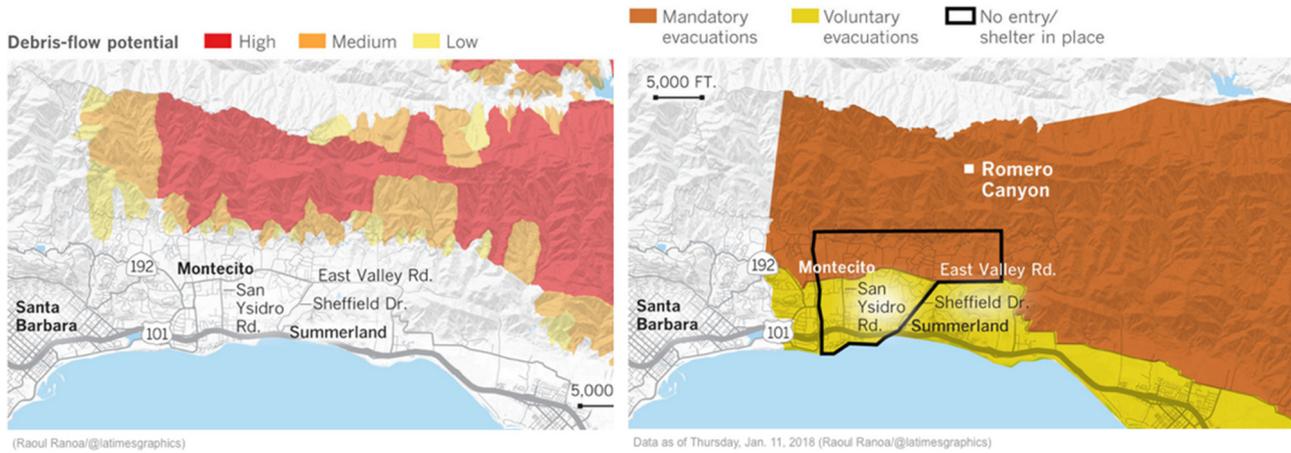


Fig. 5. Cartographie du potentiel d'occurrence d'une coulée de débris en amont de Montecito (à gauche) et planification des évacuations, obligatoires ou facultatives (à droite).

perfectible, mais ils ont pour avantage d'apporter des informations qui peuvent être complémentaires dans le temps (Fig. 6) ;

- les gouverneurs consacrent des budgets conséquents pour augmenter les moyens de lutte contre les feux et pour accroître la capacité de réaction des acteurs de secours, mais en fin de compte, de nombreuses forêts et paysages dominés par les *chapparals* sont bien adaptés au feu. Ils doivent brûler pour promouvoir une écologie saine. Ainsi, les incendies vont continuer, et le gouverneur Newsom a proposé fin 2018 un milliard de dollars pour la lutte contre les incendies. Or, il faut avoir conscience des processus qui font suite aux incendies, et plus travailler sur les effets « dominos » et les liens avec les inondations par exemple, pour ne pas avoir une vision binaire et mono-risque, qui cloisonnent les approches et enferment les savoirs dans des sphères closes ;
- d'autres régions pourraient avoir besoin de développer ce travail d'anticipation. L'expérience acquise entre les agences américaines (locales, régionales et fédérales), afin de répondre efficacement aux incendies et aux comportements hydrologiques associés, doit être mutualisé pour éviter d'assister à de nouvelles catastrophes. En France, c'est aussi le cas : le service Rivières et Torrents de Montagne (RTM) est sensibilisé à ces questions depuis plus de 40 ans, tout comme d'autres agences, mais la mutualisation des connaissances, des données et des retours d'expérience doit être coordonnés pour aider les décideurs à agir en temps réel et avant ces aléas.

6 Conclusions

Cet événement est intéressant pour deux raisons. Non seulement, il montre l'importance de la mutualisation des savoirs et de leur intégration dans la chaîne opérationnelle, en gardant à l'esprit qu'il faut penser le système territorial en perpétuelle interaction (effets dominos entre les aléas, les risques et les territoires). Mais il montre aussi que les jeux

d'échelles et les interactions spatiales peuvent transformer des ruissellements de surface en véritables coulées de débris, dévastatrices et dommageables, en l'espace de quelques minutes. Si l'intensité de la pluie avait été plus faible (en accord avec les prévisions de la veille), ou le cumul plus étalé dans le temps, les réactions hydrologiques auraient sans doute été plus faibles. Si l'incendie n'avait pas été aussi marqué sur les bassins amont, les réactions auraient là aussi été plus modérées (les simulations montrent un seuil dans les pics de pointe et les volumes ruisselés à partir de 35 % de surfaces brûlées sur Montecito et San Ysidro Creek). Il faut donc affiner les connaissances sur ces seuils critiques, et considérer l'ensemble des composantes au sein de l'hydrosystème, pour imaginer toute les configurations possibles (quitte à imaginer les pires scénarios). Et il faut également tirer les leçons des événements passés, sans chercher la responsabilité ou les erreurs, ou savoir si le pire a été évité, ou si tout a été mis en œuvre pour gérer au mieux l'événement. C'est en mutualisant tous ces savoirs que la gestion du risque, partagé, intégré, servira à l'ensemble de la société.

References non citées

Kundzewicz *et al.* (2018) et Shreve (1966).

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier le Comité exécutif du Fonds France-Berkeley, pour le financement du projet « *Des feux de forêt épiques aux crues éclair épiques : Repenser la gestion des risques d'inondation à une époque d'extrêmes* », approuvé pour un financement de 11 000 dollars sur l'année 2019–2020. Les auteurs tiennent aussi à remercier chaleureusement les participants du séminaire organisé le 5 février 2020, en particulier N. Sitar, S. Lindbergh, Y. He, P. Norton, L. Comfort (Université de Californie), J. Schwartz (Los Padres National Forest Service), R. Lewin (Director Santa Barbara County Office of Emergency Management), D. Winnacker (Fire Chief, Moraga Orinda Fire District) et J. Lancaster (California Geological Survey), ainsi que N. Leuba (Master I Avignon), qui a réalisé son mémoire universitaire sur ce sujet.

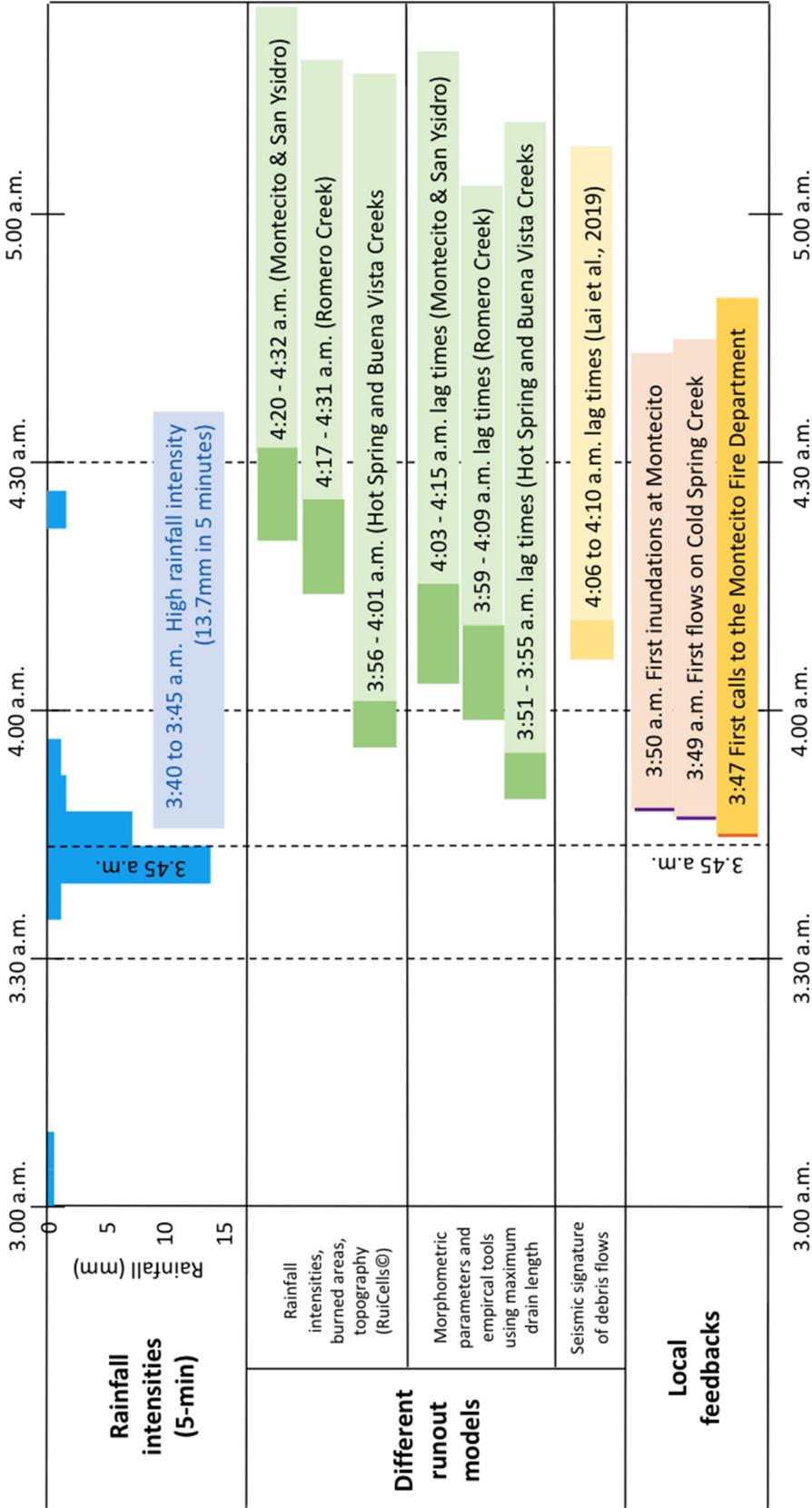


Fig. 6. Vision synoptique des temps d'arrivée des premiers impacts estimés par différentes approches.

Références

- 484
- 485 BAER, U.S. Forest Service Burned Area Emergency Response. 2018. Thomas Fire Burn Area Emergency Response (BAER) Team Reports. <https://www.fs.usda.gov/detail/lpnf/home/?cid=fseprd570093>. 547
- 486
- 487
- 488
- 489 Bessette-Kirton EK, Kean JW, Coe JA, Rengers FK, Staley DM. 2019. An evaluation of debris-flow runoff model accuracy and complexity in Montecito, California: Towards a framework for regional inundation-hazard forecasting. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation*, Association of Environmental & Engineering Geologists, Special Publication 28, pp. 257–264. 548
- 490
- 491
- 492
- 493
- 494
- 495
- 496 Booker FA. 1998. Landscape and management response to wildfires in California. MSc Thesis, University of California, Berkeley, 486 p. 549
- 497
- 498 Cannon SH. 2001. Debris-flow generation from recently burned watersheds. *Environ Eng Geosci* 7: 321–341. 550
- 499
- 500 Cannon SH, Gartner JE. 2005. Chapter 15: Wildfire-related debris flow from a hazards perspective. In: Jakob M, Hungr O, eds. *Debris flow hazards and related phenomena*, Berlin, Heidelberg: Praxis, Springer, pp. 363–385. 551
- 501
- 502
- 503
- 504 Cannon SH, Gartner JE, Wilson RC, Bowers JC, Laber JL. 2008. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology* 39: 250–269. 552
- 505
- 506
- 507
- 508 Cannon SH, Gartner JE, Rupert MG, Michael JA, Rea AH, Parrett C. 2010. Predicting the probability and volume of post wildfire debris flows in the intermountain western United States. *Geol Soc Am Bull* 122: 127–144. 553
- 509
- 510
- 511
- 512 Ciu Y, Cheng D, Chan D. 2019. Investigation of Post-Fire Debris Flows in Montecito. *Intern J Geo-Inform* 8(5). <https://www.mdpi.com/2220-9964/8/1/5>. 554
- 513
- 514
- 515 Coe JA, Kean JW, Godt JW, *et al.* 2014. New insights into debris-flow hazards from an extraordinary event in the Colorado Front Range. *GSA Today* 24(10): 4–10. <https://doi.org/10.1130/GSATG214A.1>. 555
- 516
- 517
- 518 Coussot P, Meunier M. 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Sci Rev* 40: 209–227. 556
- 519
- 520 Douvinet J, Delahaye D, Langlois P. 2008. Modélisation de la dynamique spatiale potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. *Cybergeo* 412. <http://www.cybergeo.eu/index16103.html>. 557
- 521
- 522
- 523
- 524 Douvinet J, Van de Wiel M, Delahaye D, Cossart E. 2014. A flash flood hazard assessment in dry valleys (northern France) by cellular automata modeling. *Nat. Hazards* 75(3): 2905–2929. 558
- 525
- 526
- 527 Hamilton M, Serna J. 2018. Montecito braced for fire, but mud was a more deadly threat. *Los Angeles Times*. <http://www.latimes.com/local/lanow/la-me-montecito-mudslidemain-20180112-story.html>. 559
- 528
- 529
- 530 Kean JW, Staley DM, Cannon SH. 2011. In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions. *J Geophys Res* 116. <https://doi.org/10.1029/2011JF002005>. 560
- 531
- 532
- 533
- 534 Kean JW, Staley DM, Lancaster JT, *et al.* 2019. Inundation, flow dynamics, and damage in the 9 January 2018 Montecito debris-flow event, California: Opportunities and challenges for post-wildfire risk assessment. *Geosphere* 15(4): 1140–1163. <https://doi.org/10.1130/GES02048.1>. 561
- 535
- 536
- 537
- 538 Keller E, Adamaitis C, Alessio P, *et al.* 2019. Applications in geomorphology. *Geomorphology*. 562
- 539
- 540
- 541
- 542 Kundzewicz ZW, Hegger DLT, Matczak P, Driessen PPJ. 2018. Flood-risk reduction: Structural measures and diverse strategies. In: *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 115(49), pp. 12321–12325. <https://doi.org/10.1073/pnas.1818227115>. 563
- 543
- 544
- 545
- 546
- 547
- 548
- 549
- 550
- 551
- 552
- 553
- 554
- 555
- 556
- 557
- 558
- 559
- 560
- 561
- 562
- 563
- 564
- 565
- 566
- 567
- 568
- 569
- 570
- 571
- 572
- 573
- 574
- 575
- 576
- 577
- 578
- 579
- 580
- 581
- 582
- 583
- 584
- 585
- 586
- 587
- 588
- 589
- 590
- 591
- 592
- 593
- 594
- 595
- 596
- 597
- 598
- 599
- 600
- 601
- 602
- 603
- 604
- 605
- 606
- Lai VH, Tsai VC, Lamb MP, Ulzio TP, Beer AR. 2018. The seismic signature of debris flows: Flow mechanics and early warning at Montecito, California. *Geophys Res Lett* 45: 5528–5535. <https://doi.org/10.1029/2018GL077683>. 564
- Langdon S, Johnson A, Sharma R. 2019. Debris Flow Syndrome: Injuries and Outcomes after the Montecito Debris Flow. *Am Surg*. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/000313481908501004>. 565
- Magnoli G. 2018. County Estimates \$46 Million Cost for Thomas Fire, Montecito Debris Flow Response. https://www.noozhawk.com/article/county_estimates_46m_cost_thomas_fire_montecito_debris_flow_response. 566
- Menabde M, Veitzer S, Gupta VK, Sivapalan M. 2001. Test of peak flow scaling in simulated self-similar river networks. *Adv Water Resour* 24: 991–999. 567
- Meyer GA, Wells SG. 1997. Fire-related sedimentation events on alluvial fans, Yellowstone National Park, USA. *J Sediment Res* 67(5): 776–791. 568
- Moody JA, Ebel BA. 2012. Hyper-dry conditions provide new insights into the cause of extreme floods after wildfire. *Catena* 93: 58–63. 569
- Nyman P, Sheridan GJ, Smith HG, Lane PN. 2011. Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia. *Geomorphology* 125: 383–401. 570
- National Weather Service. 2018. Flash Flood & Debris Flow Event Montecito, California January 9, 2018. <https://www.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=541c23aa483b48978d1bc9904a6fb14d>. 571
- Oakley NS, Cannon F, Munroe R, *et al.* 2018. Brief communication: Meteorological and climatological conditions associated with the 9 January 2018 post-fire debris flows in Montecito and Carpinteria, California, USA. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 18: 3037–3043. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3037-2018>. 572
- Pareschi MT, Favalli M, Giannini F, Sulpizio R, Zanchetta G, Santacroce R. 2000. May 5, 1998, debris flows in circumvesuvian area (southern Italy): insights for hazard assessment. *Geology* 28: 639–642. 573
- Parise M, Cannon SH. 2012. Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds. *Nat Hazards* 61: 217–227. 574
- Parrett C. 1987. Fire-related debris flows in the Beaver Creek drainage, Lewis and Clark County, Montana. *U.S. Geol Surv Water-Supply Paper* 2330: 57–67. 575
- Restrepo P, Jorgensen DP, Cannon SH, *et al.* 2008. Joint NOAA/NWS/USGS prototype debris flow warning system for recently burned areas in southern California. *Bull Am Meteorol Soc* 89: 1845–1851. 576
- Robert D, Niehaus I. 2018. The Economic Impacts of the Montecito Mudslides a Preliminary Assessment. http://www.rdniehaus.com/rdn/wp-content/uploads/2018/03/RDN_Montecito_Mudslides_Impacts-1.pdf. 577
- Rodriguez-Iturbe I, Rinaldo A. 1997. Fractal River Basins, chance and self-organization. Cambridge: Cambridge University Press, 547 p. 578
- Santi PM, deWolfe VG, Higgins JD, Cannon SH, Gartner JE. 2008. Sources of debris flow material in burned areas. *Geomorphology* 96: 310–321. 579
- Shreve RL. 1966. Statistical law of stream numbers. *J Geol* 74: 17–37. 580
- Stock J, Dietrich WE. 2006. Erosion of steepland valleys by debris flows. *GSA Bull* 118: 1125–1148. 581

- 607 Takahashi T. 2007. Debris flow: Mechanics, prediction and 614
608 countermeasures. London, UK: Taylor and Francis, 448 p. 615
609 <https://doi.org/10.1201/>. 616
610 United State Geological Survey, USGS. 2018. Emergency assessment 617
611 of post-fire debris-flow hazards 2017 Thomas Fire. [https://](https://landslides.usgs.gov/hazards/postfire_debrisflow/detail.php?objectid=178) 618
612 [landslides.usgs.gov/hazards/postfire_debrisflow/detail.php?objec](https://landslides.usgs.gov/hazards/postfire_debrisflow/detail.php?objectid=178) 619
613 [tid=178](https://landslides.usgs.gov/hazards/postfire_debrisflow/detail.php?objectid=178). 620
- WERT, Watershed Emergency Response Team. 2018. Thomas 614
Fire–Watershed Emergency Response Team Final Report. 615
[http://cdfdata.fire.ca.gov/incidents/incidents_details_info?inciden](http://cdfdata.fire.ca.gov/incidents/incidents_details_info?incident_id=1922) 616
[t_id=1922](http://cdfdata.fire.ca.gov/incidents/incidents_details_info?incident_id=1922). 617
Wondzell SM, King JG. 2003. Postfire erosional processes in the 618
Pacific Northwest and Rocky Mountain regions. *Forest Ecol* 619
Manag 178: 75–87. 620

Citation de l'article : Douvinet J, Serra-Llobet A, Radke J, Kondolf M. 2020. Quels enseignements tirer des coulées de débris post-incendie 621
survenues le 9 janvier 2018 à Montecito (Californie, USA)? *La Houille Blanche* Vol 622

Questions à l'auteur

- Q1 Merci de nous transmettre les éléments manquants (le nom de la ville et du pays) pour les adresses de correspondance [1,2,3].
- Q2 Les figures [2 et 3] n'ont pas été appelées dans le manuscrit et nous avons par conséquent inséré les appels. Merci de vérifier. Si ce n'est pas approprié, merci d'ajouter les appels là où vous les estimerez nécessaire.
- Q3 Veuillez ajouter l'appel des références dans le corps du texte.

UNCORRECTED PROOF