Interreg
UNIONE EUROPEA
MARITTIMO-IT FR-MARITIME
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale
ADAPT

Livrable 6

Une proposition méthodologique de stratégie d'aménagement post-incendie

Rédigé par J. Josse (stagiaire) et D. FOX (PR)

cnrs

1 Introduction

Le département du Var est un territoire fortement exposé aux incendies. Sur les 15 départements de la zone Prométhée, entre 1973 et 2019 le Var est le deuxième département le plus incendié, avec au total 131 889 ha brulés (Prométhée, s.d.). Les années de 2003 et 2017 ont été particulièrement importantes : alors que depuis le début des années 1990 le nombre d'incendies avaient été limités, l'année 2003 marque un record de surfaces incendiées depuis 1978 (Alexandiran, 2008). Le Var est cette année-là le deuxième département le plus touché. L'année 2017 a aussi vu de grands incendies avec au total 4 188 hectares qui sont partis en fumée, ce qui est bien supérieur à la moyenne de ces 5 dernières années (985 ha) [1]. Les incendies ont des impacts non négligeables sur le territoire. En plus des dégâts immédiats (destructions de biens, d'espaces naturels, pollutions etc..), la destruction de zones végétalisées par l'incendie induit de nouvelles problématiques: augmentation des débits, érosion des sols, glissements de terrain, chutes de blocs, et cela dans la zone incendiée mais aussi en aval (ensablement, érosion et destructions des infrastructures et des biens etc.).[1] Ainsi, les acteurs locaux sont contraints de mettre en place des ouvrages de protection permettant de limiter notamment l'écoulement des eaux et l'érosion des sols. Ces infrastructures étant coûteuses, leur mise en place fait appel à des choix stratégiques.

C'est dans ce contexte que s'insère la création d'une stratégie de lutte post-incendie contre les inondations qui s'appuie sur une modélisation hydrologique et un indice de vulnérabilité. En effet la présente étude sera centrée sur les risques d'inondation post-incendie. Elle comporte plusieurs sous-objectifs : le premier est la compréhension du rapport entre surface incendiée et augmentation du débit ; le deuxième est la délimitation de zones vulnérables aux inondations post-incendie ; le troisième objectif est la hiérarchisation de ces zones vulnérables par la création d'un indice. La méthode devra aussi être reproductible par les différents acteurs du territoire dans le but d'appuyer le travail de terrain déjà mis en place actuellement après chaque incendie.

Dans un premier temps seront présentées les différentes méthodes qui ont permis de construire l'indice. Dans une deuxième partie, les secteurs d'études, les données, ainsi que les différentes méthodes mises en place seront présentées. Par la suite les résultats seront exposés. Enfin, dans une dernière partie ceux-ci seront discutés.

2 Etat de l'art

Les méthodes mises en place dans ce mémoire, ont été ont inspirées de différents travaux sur la classification de la zone parcourue par le feu, la modélisation hydrologique et cartographie de la zone inondable.

2.1 La cartographie de la cicatrice du feu

Les différentes méthodes de cartographie de cicatrice du feu sont décrites dans l'article de Fox *et al*. (2008). La première méthode de cartographie est le « *Composite Burn Index* » (CBI). Cet indice se base sur des observations de terrain post-incendie : l'état de la végétation ainsi que l'état de la litière y sont quantifiés. Cette méthode est précise mais demande du temps et des moyens pour se rendre sur place.

1 http://www.georisques.gouv.fr

Cela n'étant pas toujours possible, des méthodes d'analyse d'images satellitaires ont été développées. Les images satellitaires sont facilement disponibles et l'analyse des bandes spectrales sont simplifiées par de nombreux logiciels. Ainsi il est possible de cartographier les surfaces incendiées à partir d'images post-incendies uniquement. Le *Normalized Burn Ratio* (NBR) et le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) sont deux méthodes d'analyse d'image post-incendie. Les deux méthodes sont basées sur le même principe : le calcul de la différence entre deux bandes. Le NBR calcul la différence entre les bandes proche infrarouge (PIR) (qui informe sur la couverture végétale) et moyen infrarouge (MIR) qui informe sur l'humidité du sol. Le calcul du NDVI est le même, seulement la bande MIR est remplacée par la bande rouge ® qui informe sur la qualité de la couverture végétale.

Équation 1:Normalized Burn Ratio

$$NBR = \frac{(PIR - MIR)}{(PIR + MIR)}$$

Équation 2: Normalized Difference Vegetation Index

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{PIR + R}$$

Il est aussi possible de cartographier la zone incendiée en comparant les images avant et après incendie. Cette fois-ci, ce n'est pas simplement l'état de la végétation et de la litière qui sont étudiés, mais la différence entre l'état avant incendie et après incendie. Les indices permettent de mettre en valeur la perte de végétation entre les deux périodes d'étude.

Équation 3:Differenced Normalised Burn Ratio

$$dNBR = (NBR\ après\ feu) - (NBR\ avant\ feu)$$

Équation 4: Differenced Normalized Difference Vegetation Index

$$dNDVI = (NDVI\ après\ feu) - (NDVI\ avant\ feu)$$

La cartographie de l'incendie peut être biaisée par une perte de végétation causée par de multiples phénomènes autres que le feu : phénologie, destruction mécanique de la végétation…. Ainsi, l'application de ces méthodes demande une analyse personnelle supplémentaire.

2.2 La cartographie des zones inondables

La cartographie des zones inondables en France représente un enjeu considérable, le risque d'inondation concerne près de la moitié des communes françaises[2]. Les plaines alluviales sont des espaces convoités pour les avantages qu'elles apportent : ce sont des terrains plats avec une bonne accessibilité et donc faciles à construire. Or ils peuvent aussi s'avérer dangereux car exposés aux risques d'inondation. Malgré cela, dans le contexte de croissance urbaine importante, les populations s'y installent, soit parce qu'elles sous-estiment ou ignorent le risque, soit parce qu'elles acceptent de le prendre. Les inondations de ces zones ont un coût humain et financier important. Ainsi, depuis 1982 une grande campagne d'évaluation des risques naturels a été lancée par l'état Français. Celle-ci devrait permettre, entre-autre, de produire une cartographie des risques d'inondation sur le territoire, puis de mettre en place des ouvrages de protection ou des règlementations qui permettent de protéger les populations.

2 https://www.observatoire-des-territoires.gouv.fr/observatoire-des-territoires/sites/default/files/IDDT_Inondation.pdf

Pour l'évaluation du risque d'inondation en France, différentes techniques d'estimation et de cartographie sont mises en œuvre : la méthode hydrogéomorphologique, et la modélisation hydraulique (Durin & Mathieu, 2007) en sont deux. La première est reconnue depuis 1996 par les ministères en charge de la prévention des risques, ainsi elle a été désignée pour la mise en œuvre sur tout le territoire français pour l'Atlas des Zones Inondables (AZI) (Durin & Mathieu, 2007). Elle est aussi recommandée pour la définition des PPRI. Le protocole mis en place pour la méthode hydrogéomorphologique est assez rapide et assez précis pour être mis en place à large échelle. Celle-ci se base sur l'observation de la morphologie des cours d'eau, de la sédimentologie, ainsi que de l'occupation du sol (Masson, Garry, & Ballais, 1996). L'analyse de ces trois éléments permet aussi de reconstituer un historique des crues par l'observation de marques sur les bâtiments, de dépôts de sédiments, ou encore de repères des crues (Masson, Garry, & Ballais, 1996). L'analyse se fait en deux étapes : dans un premier temps les différents lits du cours d'eau sont définis grâce à l'analyse de photographies aériennes puis, pour compléter le zonage, des études de terrain sont entreprises (Durin & Mathieu, 2007). Celles-ci permettent d'affiner l'analyse. Finalement, à partir des informations récoltées ; l'étendue des différentes unités hydrogéomorphologiques est définie ; à chacune de celle-ci correspond une fréquence de submersion par les crues (Durin & Mathieu, 2007) :

- Lit mineur : emprises des crus non débordantes.
- Lit moyen : emprise du champ d'inondation de crus fréquents.
- Lit majeur : emprise du champ d'inondation des crus rares et exceptionnels.

Ainsi il n'existe pas une seule zone inondable, la définition de la zone dépend de la récurrence de crue choisie.

En région PACA les unités hydrogéomorphologiques de la majorité des cours d'eau ont été cartographiées et publiées dans l'AZI (DREAL, 2018). Cette base de données peut être utilisée notamment en aménagement du territoire comme outil d'aide à la décision (Durin & Mathieu, 2007). Cependant, cette approche a des défauts qu'il faut prendre en compte : les cours d'eau secondaires n'ont pas été soumis à l'étude, l'AZI à lui seul est un document informatif et non juridique (il ne fait pas loi sur le territoire), et la méthode ne contient pas d'étude quantitative (Masson, Garry, & Ballais, 1996).

Ainsi, afin de définir de manière plus précise les zones inondables et créer un document juridique qui permettrait de mettre en place des réglementations (le Plan de Prévention des Risque Inondation (PPRI)), les communes Françaises complètent l'étude hydrogéomorphologique par une l'étude hydraulique des cours d'eau (Masson, Garry, & Ballais, 1996). Celle-ci passe par une modélisation de l'écoulement de l'eau pour un aléa de référence : pour la majorité des PPRI, c'est une crue de période de retour 100 ans. Les modélisations prennent en compte la topographie, l'occupation du sol (rugosité, position des bâtiments, des rues etc.), la présence d'ouvrages de protection (leur taille et résistance), la hauteur ainsi que la vitesse de l'eau (Durin & Mathieu, 2007). Cette technique quantitative permet d'obtenir une carte informant sur la vitesse et la hauteur de l'eau pour un aléa, et à partir de celle-ci les zones à risques sont définies et hiérarchisées. Cette méthode étant plus complexe, elle ne peut être mise en place qu'à échelle plus fine. Il appartient à chaque commune ou communauté de communes de mettre en place ce type d'étude et de créer leur propre PPRI. Ainsi, alors que l'AZI recouvre presque la totalité du territoire, les PPRI, plus complexes, n'ont pas encore été créés dans certaines communes.

3 Méthodes

3.1 Présentations des secteurs d'études

Cinq secteurs (Tableau 1 & Figure 1) ont été définis dans le département du Var dans le cadre du projet INTERREG ADAPT. Les zones ont été choisies car elles ont subi un incendie de grande ampleur en 2003 ou 2017, deux années où les surfaces brulées ont été particulièrement importantes. Chaque secteur prend le nom de la commune où l'incendie s'est déclaré, cela même si elle s'étend sur un territoire bien plus vaste. Ainsi les secteurs d'étude suivants ont été sélectionnés. Les données concernant les superficies parcourues par le feu la cause d'incendie ont été relevées de la base de données Prométhée (www.promethee.fr).

Secteur 1 : Vidauban

Le secteur de Vidauban prend en compte deux incendies qui ont eu lieu à 10 jours d'intervalle le 17/07/2003 et le 28/07/2003. Le premier s'est étendu sur 6 744 ha et le deuxième sur 5 646 ha, soit un total de 12 390 ha (Prométhée, s.d.). Ces deux incendies sont d'origine criminelle, ils se sont déclarés depuis les bords de route situés au nord du massif des Maures et, attisés par le vent, ils se sont étendus dans des collines de garrigues et de forêt Méditerranéenne vers le Sud-Est, passant par-dessus les coupures de combustibles, jusqu'au littoral (Perchat & Rigolot, 2005).

Secteur 2 : Le Cannet-des-Maures

Dans le secteur du Cannet-des-Maures, l'incendie date du 31/08/2003, il est lui aussi d'origine criminelle. Il s'est étendu du nord au sud-est dans la forêt du massif des Maures sur 2 726 ha.

Secteur 3 : La Croix-Valmer

Le secteur de La Croix-Valmer est en partie recouvert par une zone brulée de 506 ha. L'incendie a été déclenché le 24/07/2017 près du Mas de Digaro de manière accidentelle par des jets d'objets incandescents. Il s'est étendu vers l'Est et le Sud, incendiant la zone protégée du cap Lardier composée en majorité de forêt méditerranéenne dense (chênes et pins).

Secteur 4 : Artigues

Le secteur d'Artigues a été incendié le 24/07/2017 sur 1 704 ha dont une grande majorité était des espaces forestiers. La zone incendiée se trouve au sud du village d'Artigues dans le lieu-dit de Camp Long. L'incendie a été déclenché par une personne malveillante sur les bords de la route départementale 3.

Secteur 5 : La Londe-les-Maures

Dans le secteur de la Londe-les-Maures le foyer de l'incendie a été allumé le 25/07/2017 par une personne malveillante près de la route départementale 98. Il s'est étendu vers le Sud jusqu'au Cap Bénat détruisant 1 423 ha de forêt méditerranéenne.

Tableau 1 : Tableau de synthèse des zones d'études.

Secteur	Incendie	Date	Surface brulée (ha)	Cause
1	Vidauban	17 et 28/07/2003	12 390	Criminelle
2	Le Cannet-des-Maures	31/08/2003	2 726	Criminelle
3	La Croix Valmer	24/07/2017	506	Jets d'objets incandescents
4	Artigues	24/07/2017	1 704	Criminelle
5	La Londe-les-Maures	25/07/2017	1 423	Criminelle

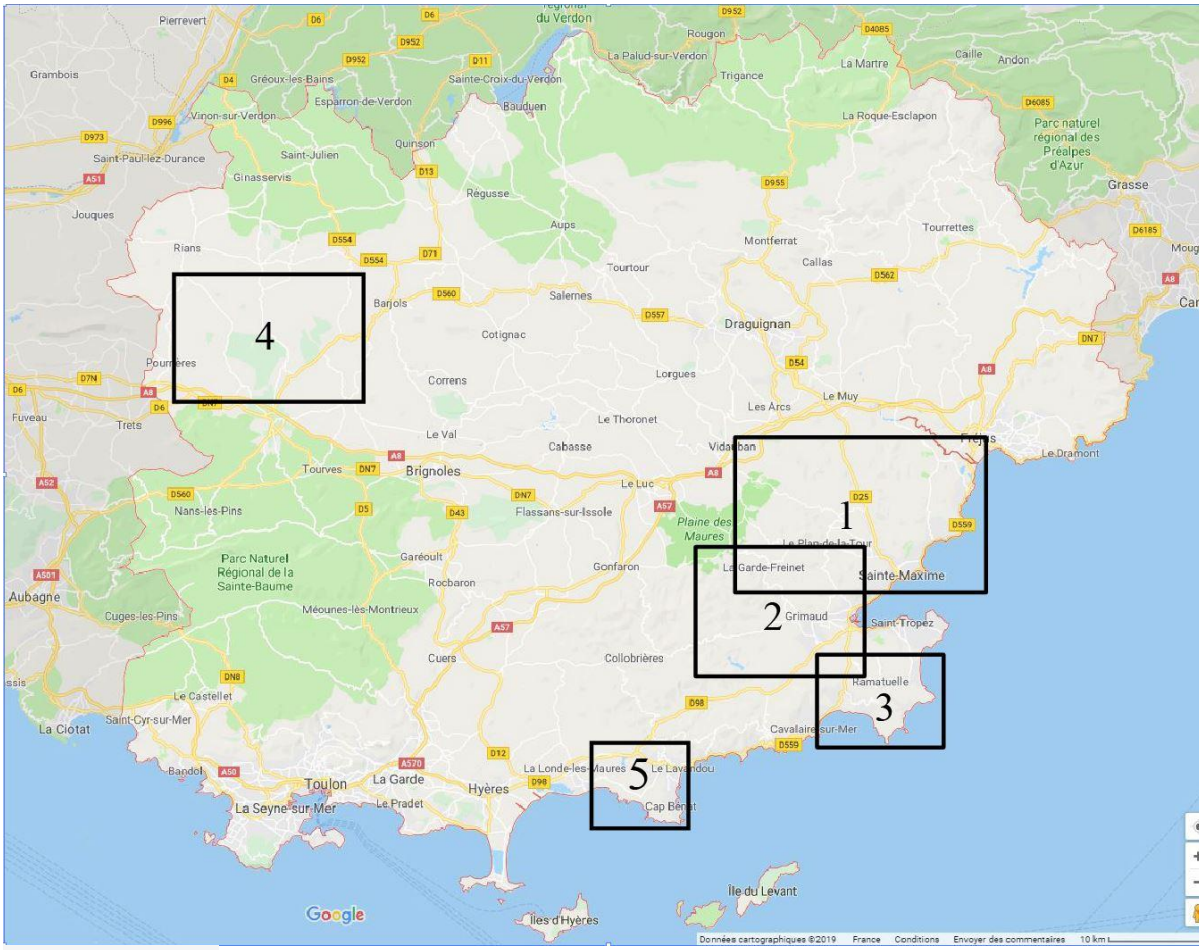


Figure 1 : Carte de localisation des zones d'étude.

3.2 Les données

3.2.1 Images satellitaires

Des images satellitaires avant et après feu pour chacune des zones ont été extraites. Pour les incendies de 2003 (Tableau 2), les images du satellite SPOT ont été utilisées (fournies par D.

Fox). Ce satellite appartient au Centre National d'Etude Spatiales Français (CNES). La résolution spectrale permet d'observer les bandes verte, rouge et proche et moyenne infrarouges. La résolution spatiale est de 10 m. Les incendies de 2017 ont été cartographiés à l'aide du satellite Sentinelle 2A. C'est un satellite de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) ; sa résolution spectrale est large (13 bandes). Les images ont été téléchargées sur un site de ressources en ligne.[3] Celui-ci permet d'obtenir les différentes bandes en format *.tiff*, dans le système de cordonnées WGS 83. Pour des questions d'uniformité des données, les bandes ont été projetées en Lambert 93, et transformées afin d'avoir une résolution de 10 m.

Tableau 2 : Synthèse des caractéristiques des images satellitaires utilisées.[4](En gras : les bandes utilisées)

Satellite	Bande	Résolution spectrale (µm)	Résolution spatiale
Sentinel-2A	**2**	**0.4966**	**10 m**
	3	**0.5600**	
	4	**0.6645**	
	8	**0.8351**	
	5	0.7039	20 m
	6	0.7402	
	7	0.7825	
	8a	0.8648	
	11	0.16137	
	12	0.22024	
	1	0.4439	60 m
	9	0.945	
	10	1.373	
SPOT	**1**	**0.50-0.59**	**10 m**
	2	**0.61-0.68**	
	3	**0.79-0.89**	
	4	**1.58-1.75**	**20 m**

3.2.2 Données d'occupation du sol

Les données d'occupation du sol sont issues de deux Bases de données différentes. La première est Corine Land Cover (CLC) issue du site de l'IGN. Cette base de données produite par l'Agence Européenne de l'Environnement fait un inventaire biophysique de l'occupation du sol à l'échelle 1/ 100 000[5] par l'exploitation d'images satellitaires. Il existe plusieurs niveaux de précision pour la description de l'occupation du sol. Dans le cadre de cette étude, le Niveau 2 sera pris en compte avec les catégories suivantes (Tableau 3) :

[3] www.apps.sentinel-hub.com/eobrowser.

4 https://spot.cnes.fr/fr

[5] www.statistiques.devellopement-durable.gouv.fr

Tableau 3 : Catégorie d'occupation du sol Corine Land Cover

Codes CLC niveau 2	Libellés
11	Zones urbanisées
12	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication
13	Mines, décharges et chantiers
14	Espaces verts artificialisés, non agricoles
21	Terres arables
22	Cultures permanentes
23	Prairies
24	Zones agricoles hétérogènes
31	Forêts
32	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
33	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation
41	Zones humides intérieures
42	Zones humides côtières
51	Eaux continentales
52	Eaux maritimes

La base de données CLC est régulièrement mise à jour depuis 1985. Ainsi, pour les zones d'études incendiées en 2003, la mise à jour de 2000 a été utilisée et celle de 2012 a été utilisée pour les zones incendiées en 2017.

La deuxième base de données est la BD TOPO®. Les objets sont représentés à l'échelle métrique. La base de données est divisée en catégories selon les éléments (hydrographie, transport, adresses bâti…). Ici sera utilisée la catégorie « Bâtiment » seulement et en 2D. Dans cette catégorie, chaque bâtiment est représenté ; l'information est alors plus précise que dans CLC où les surfaces bâties incluent jardins, routes, parcs….

3.2.3 Données pluviométriques

Les données de précipitations utilisées sont issues de la station du Luc située au nord de la plaine des Maures. Ce sont des données pluviométriques en mm/j de 1978 jusqu'à 2018. D'après la Figure 2, la quantité de pluie précipitée pour une période de retour de 5 ans au Luc est de 86 mm/jour (41 ans / 5 ans = 8.2 événements).

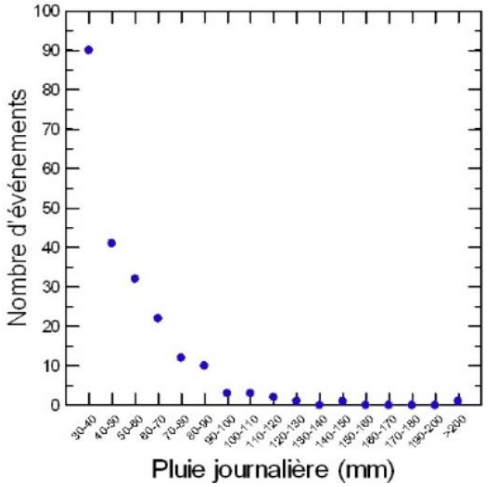


Figure 2: Graphique représentant la récurrence des précipitations.

3.3 Démarche

3.3.1 Cartographie de la cicatrice du feu

La cartographie de la zone parcourue par le feu est un élément central de cette étude. La méthode de cartographie choisie est le dNDVI car elle donne des résultats équivalents ou meilleurs que le dNBR et est mieux connu.

Le NDVI est un indice allant de -1 à 1, où -1 représente une surface chargée en eau, 0 est une surface minérale et 1 une surface à végétation très dense : l'augmentation de la valeur entre 0 et 1 indique une augmentation de la végétation verte. La différence entre deux valeurs de NDVI à des dates différentes (après feu – avant feu) permet d'observer l'évolution de la végétation. Si le dNDVI est inférieur à 0 alors il y a perte de végétation, s'il est supérieur à 0 il y a augmentation des végétaux. Ensuite, il est nécessaire de reclasser le dNDVI afin de ne sélectionner que la zone incendiée, et de supprimer les possibles erreurs induites par la présence de nuages, des changements dus à l'activité humaine (agriculture et sylviculture) ou encore au changement de saison.

3.3.2 Méthode de définition de l'occupation du sol

Afin de définir l'occupation du sol, les données CLC ont été simplifiées en 6 catégories décrites dans le tableau 4 :

Tableau 4 : Catégories d'occupation du sol simplifiées.

Corine Land Cover	Nouvelles catégories
Zones urbanisées	Zones urbanisées
Zones industrielles	
Cultures permanentes	Zones agricoles
Zone agricole hétérogène	
Prairies	Prairies
Espaces verts	
Terres arables	
Forêt	Forêt
Végétation arbustive ou herbacée	Végétation arbustive ou herbacée
Zones humides	Eaux continentales
Eaux continentale	
Eaux Maritimes	Eaux Maritimes

Par la suite, les données ont été croisées avec la couche « Bâtiments Indifférenciés » de la BD TOPO® afin de créer une catégorie supplémentaire recensant uniquement les bâtiments. Ainsi, sur la carte d'occupation du sol, les bâtiments apparaissent, qu'ils se trouve en zone urbanisé, agricole ou dans un espace naturel. Cela permet de ne pas sous-estimer la présence d'habitation hors des zones urbaines, surtout dans ces espaces où la périurbanisation et le mitage sont importants.

3.3.3 Méthode de modélisation du ruissellement

La modélisation du ruissellement a été faite avec le module RUNOFF du logiciel TerrSet. Celui-ci permet de calculer la quantité d'eau ruisselée en fonction d'une lame d'eau précipitée et d'une couche d'eau infiltrée. Comme il a été décrit ci-dessus, la période de retour choisie est de 5 ans avec une pluie journalière de 86 mm.

Afin de définir les quantités infiltrées il a été nécessaire de définir des coefficients de ruissellement pour chaque occupation du sol. Le coefficient de ruissellement est le rapport entre la lame d'eau ruisselée et la lame d'eau précipitée. Celui-ci dépend de différents paramètres, tels que le type de sol, l'occupation du sol, l'inclinaison de la pente, ou encore la saturation du sol. De nombreux auteurs ont créés des tableaux présentant des valeurs approximatives de coefficients de ruissellement ; Les coefficients utilisés ici sont inspirés des valeurs présentées par Chow et al. (1988).

Les coefficients ont été adaptés aux classes d'occupation du sol, aux types de sols présents sur la zone d'étude, et aux pentes.

Tableau 5 : Coefficients de ruissellement en fonction de l'occupation du sol et de la pente.

Occupation du sol	Pentes (%)	Coefficients de ruissellement
Bâtiments	0 et plus	0.95
Zones urbanisées	0 et plus	0.80
Zones agricoles	0 à 5 % 5 à 10% 10% et plus	0.40 0.45 0.50
Prairies	0 à 5 % 5 à 10% 10% et plus	0.20 0.25 0.30
Forêts	0 à 5 % 5 à 10% 10% et plus	0.15 0.24 0.25
Végétation arbustive ou herbacée	0 à 5 % 5 à 10% 10% et plus	0.30 0.35 0.40
Eaux continentale	0 et plus	1.00
Eaux maritimes	0 et plus	1.00
Zones incendiées	0 à 5 % 5 à 10% 10% et plus	0.50 0.55 0.60

A partir de ces coefficients de ruissellement il est possible de définir les valeurs journalières d'infiltration :

Équation 5: Infiltration journalière

$$Infiltration = 1 - (coefficient\ de\ ruisselement * pluie)$$

*Tableau 6 : Quantités **infiltrées** en mm/jrs en fonction de l'occupation du sol et de la pente pour une précipitation de 86 mm.*

Occupation du sol	Pentes (%)	Infiltration (mm/jour)
Bâtiments	0 et plus	4.3
Zones urbanisées	0 et plus	17.2
Zones agricoles	0 à 5 % 5% à 10% 10% et plus	51.6 47.3 43.0
Prairies	0 à 5 % 5% à 10% 10% et plus	68.8 64.5 60.2
Forêts	0 à 5 % 5% à 10% 10% et plus	73.1 65.4 64.5
Végétation arbustive ou herbacée	0 à 5 % 5% à 10% 10% et plus	60.2 55.9 51.6
Eaux continentale	0 et plus	0.0
Eaux maritimes	0 et plus	0.0
Zones incendiées	0 à 5 % 5% à 10% 10% et plus	43.0 38.7 34.4

Ainsi dans l'outil *Runoff* du logiciel TerrSet, les données d'entrée sont le MNT, la couche Des précipitations et la couche d'infiltration. La modélisation hydrologique a été faite pour l'occupation du sol avant incendie puis pour l'occupation du sol post incendie. Il a été estimé que le coefficient de ruissellement de la forêt parcourue par le feu est de 0.50 pour quantifier l'impact de l'incendie sur le ruissellement.

3.3.4 Méthode de définition des zones inondables

Comme cela a été présenté ci-dessus, des méthodes reconnues pour définir les zones inondables existent, or celles-ci ont des défauts non-négligeables : l'AZI couvre seulement les cours d'eau principaux. Et les PPRI, basées sur des modélisations hydrologiques, n'ont pas été finalisés pour toutes les communes de la région. Ainsi il manque des informations importantes dans ces bases de données et elles ne seront donc pas utilisées telles quelles pour l'étude. De nouvelles zones inondables seront définies en se basant sur une méthode similaire à celle de l'AZI. L'avantage de l'AZI est qu'il recouvre la majorité des grands cours d'eau de la région et qu'il est basé sur la méthode hydrogéomorphologique, qui est plus simple de reproduire et d'étendre sur des espaces non étudiés. Ainsi des paramètres ont été définit afin d'obtenir un résultat le plus proche de celui de l'AZI.

Dans un premier temps il a été déduit que les espaces inondables étaient en majorité des espaces plats (plaines alluviales). Ainsi seules les espaces dont la pente est inférieure à 5% ont été retenues.

Une limite d'altitude a aussi été créée pour chacune des zones d'études, se basant sur la limite supérieure des zones inondables de l'AZI. Les limites supérieures d'altitude définies pour chaque zone sont les suivantes (Tableau 7) :

Tableau 7 : Limites supérieurs des zones inondables

Zone d'étude	Limite d'altitude supérieure (m)
La Londe-les-Maures	30
Artigues	350
La Croix-Valmer	200
Le Cannet-des-Maures	280
Vidauban	150

En utilisant seulement ces deux paramètres, les zones inondables créées étaient beaucoup trop larges sur les parties amont par rapport à ce que prévoit l'AZI. Puisque la largeur de la zone potentiellement à risque dépend aussi de la taille du bassin versant en amont, une zone tampon a été créée de chaque côté des cours d'eau concernés par l'incendie de forêt. Comme présenté dans le tableau 8, la largeur de la zone tampon varie en fonction de la taille du bassin versant en amont.

Tableau 8 : Largeur des zones tampon en fonction du bassin versant en amont.

Bassin versant en Hectares	Zone tampon en mètres
0 à 250	0.0
250 à 500	50.0
750 à 1000	75.0
1000 à 1250	112.5
1250 et plus	213.1

3.3.5 Méthode de création de l'indice de vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité sur un territoire est un élément du risque qui est complexe à définir et à cartographier. De nombreuses études scientifiques ont été faites à ce sujet : les différents éléments jouant sur la vulnérabilité ont été définis et différentes méthodes d'évaluation puis de cartographie ont pu être mises en place (Léone & Vinet). Dans la synthèse de Léone & Vinet (2006), plusieurs approches sont possibles : le type d'aléas, le type de vulnérabilité (humaine, structurelle, environnementale, économique, etc.) et l'approche d'évaluation (évaluation de la sensibilité à l'endommagement, de la caractérisation de l'endommagement ou bien de la réponse à l'endommagement). Ainsi la création d'un indice de vulnérabilité est très complexe. Il demande la constitution d'une base de données importante prenant en compte tous les enjeux du territoire : structural, corporel, social, environnemental, fonctionnel et institutionnel.

Une excellente connaissance du territoire et de sa population est nécessaire à la constitution d'un indice et demanderait une étude approfondie de chaque zone d'étude. Par manque de temps et de données, l'indice créé a été inspiré des différents éléments décrits dans l'article de Leone et Vinet (2006), ainsi que du rapport de Mathy (2018), qui présente les différents types et niveaux de vulnérabilité à prendre en compte lors de la création d'un indice. Finalement, 4 niveaux de vulnérabilité ont été définis et appliqués à l'occupation du sol. Les indices créés sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Indices de vulnérabilité en fonction de l'occupation du sol.

Catégorie d'occupation du sol initiale	**Nouvelles catégories définies pour la vulnérabilité**	**Indices de vulnérabilité**
Bâtiments	Bâtiments	50
Zones urbanisée	Zones urbanisée	30
Zones agricoles	Zones agricoles	5
Prairies	Zones Naturels	0
Forêt		
Végétation arbustive ou herbacée		
Eaux continentales		
Eaux maritimes		

Ainsi on considère que dans un espace agricole, la densité de population et la valeur économique des biens sont moins importantes qu'en zone urbanisée

3.3.6 Méthode de mesure de l'impact des incendies sur l'augmentation du ruissellement.

Afin d'évaluer quel a pu être l'impact de l'incendie sur le ruissellement, les modélisations hydrologiques ont été faites avant et après incendie. Les valeurs de lame d'eau ruisselée avant et après incendie ont été relevées sur les cours d'eau prenant source dans les zones incendiées. Les valeurs de ruissellement ont été notées à deux endroits pour chaque incendie : une première à l'entrée des zones vulnérables et une deuxième à 1 km en aval quand cela était possible, si non la mesure a été faite à l'exutoire.

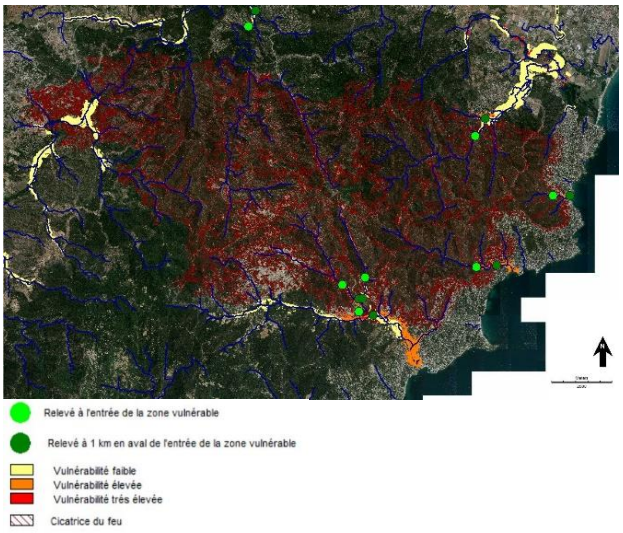


Figure 3 : Localisation des relevés dans le secteur 1 : Vidauban.

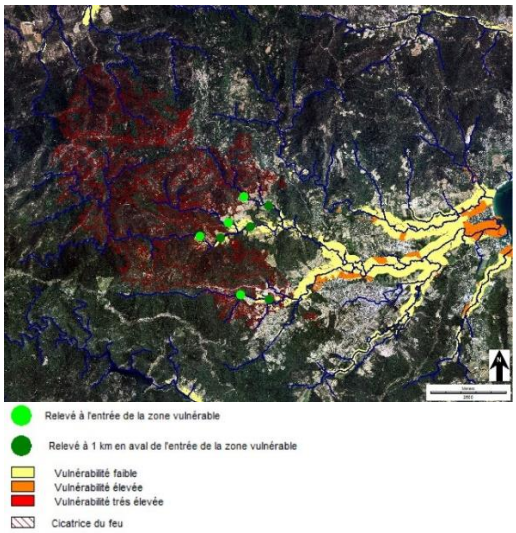


Figure 4 : Localisation des relevées dans le secteur 2 : Le Cannet des Maures.

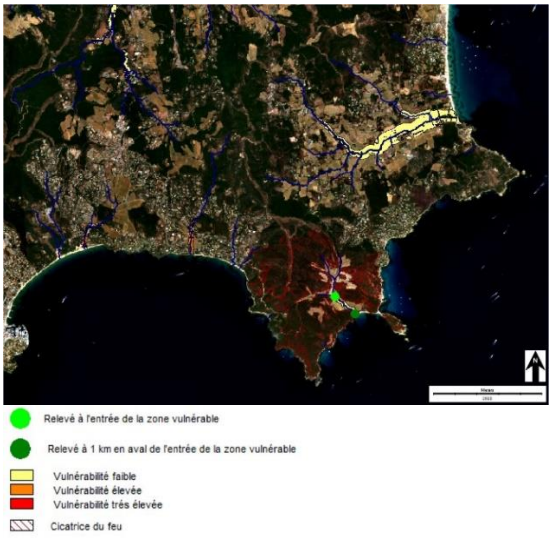


Figure 5 : Localisation des relevés dans le secteur 3 : La-Croix-Valmer.

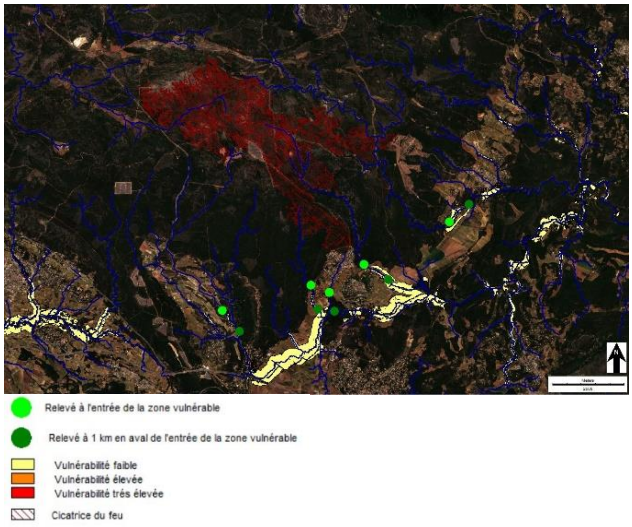


Figure 6 : Localisation des relevés dans le secteur 4 : Artigues.

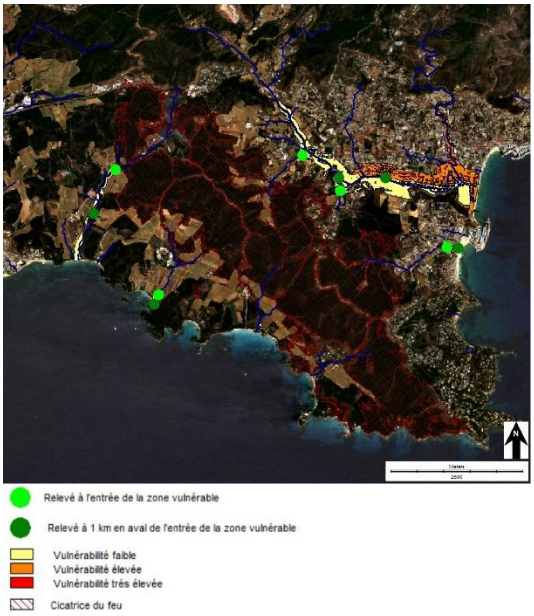


Figure 7 : Localisation des relevés dans le secteur 5 : La Londe-les-Maures.

A partir de ces relevés différents éléments ont pu être définis, tels que l'augmentation du ruissellement, la taille du bassin versant en amont, et la part incendiée des bassins versant.

3.3.7 Méthode de définition de la vulnérabilité aux inondations post-incendies.

Parmi les zones inondables qui ont été définies ci-dessus, certaines se situent de part et d'autre de cours d'eau dont le débit n'a pas été modifié par l'incendie de forêt. Or, cet indice de vulnérabilité aux inondations ne concerne que les zones incendiées ou en aval d'un incendie. Ainsi, seul les cours d'eau impactés ont été sélectionnés. Parmi ceux-ci, il a été défini qu'une augmentation du débit d'au moins 20% était nécessaire pour considérer que le débit du cours d'eau présente un potentiel danger.

Afin de mesurer la vulnérabilité, seul les espaces vulnérables où l'augmentation du débit dans le cours est supérieure à 20% ont été sélectionné. La surface de chaque type de zone vulnérable a été mesurée, puis multiplié par l'indice de vulnérabilité correspondant (Equation 6).

Équation 6:Vulnérabilité aux inondations post-Incendies

$$\begin{aligned} &Indice\ de\ vulnérabilité \\ &= Surface\ faiblement\ vulnérable(ha) * 5 \\ &+ surface\ fortement\ vulnérable(ha) * 30 \\ &+ Surface\ très\ fortement\ vulnérable(ha) * 50 \end{aligned}$$

Ainsi les bassins versants à forte vulnérabilité sont à protéger en priorité car ils comportent à la fois de grands espaces vulnérables et/ou des zones plus fragiles, tels que des bâtiments ou des zones urbanisées.

4 Résultat

4.1 Les cicatrices de feux.

D'après la comparaison entre la base de données Prométhée et les résultats produit ici (Tableau 10), il semblerait que le reclassement du dNDVI sous-estime par 10 à 22% les superficies notées dans la base de données Prométhée. Les méthodes de mesure mises en place par Prométhée n'ont pas été publiées, alors il nous est impossible de déterminer la source de cette différence. En comparant les images satellitaires et le classement par dNDVI, il semblerait néanmoins que Prométhée surestime les surfaces parcourues par le feu.

Tableau 10 : Evaluation de la surface des incendies.

Zone d'étude	Surface brulée d'après Prométhée.	Surface mesurée après le calcul du DNDVI.	Différence en %
Vidauban	12 390	11 178	-10%
Le Cannet des Maures	2 726	2 212	-19%
La Croix Valmer	506	409.	-19%
Artigues	1 704	1 330	-22%
La Londe les Maures	1 423	1 225	-14%

Le classement du dNDVI a permis de mettre en valeur les zones où la perte de végétation était importante et les erreurs induites par les actions anthropiques (coupes forestières…) ont pu être supprimées. Ainsi on obtient une cicatrice du feu très proche de la réalité, comme cela est observable dans les Figures 8 à 17.

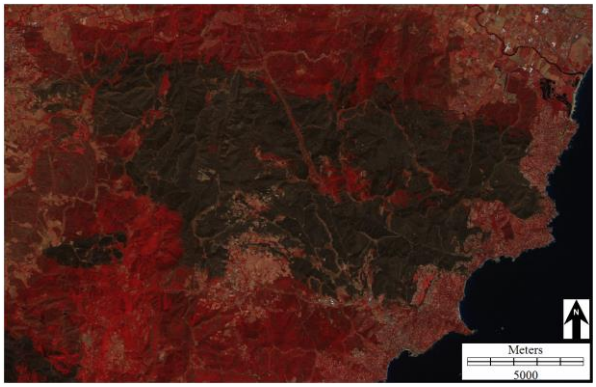
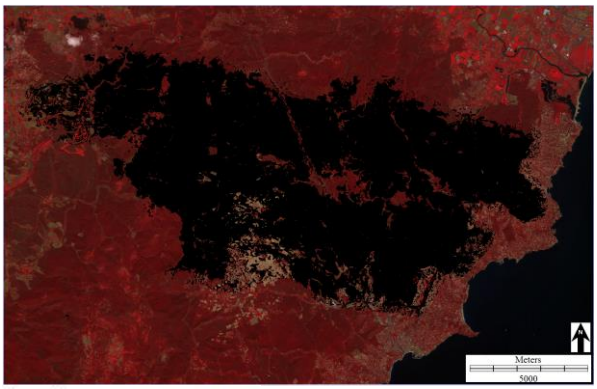


Figure 8 : Image fausse couleur, secteur 1 : Vidauban.



Cicatrice du feu

Figure 9: Cicatrice du feu Secteur 1: Vidauban

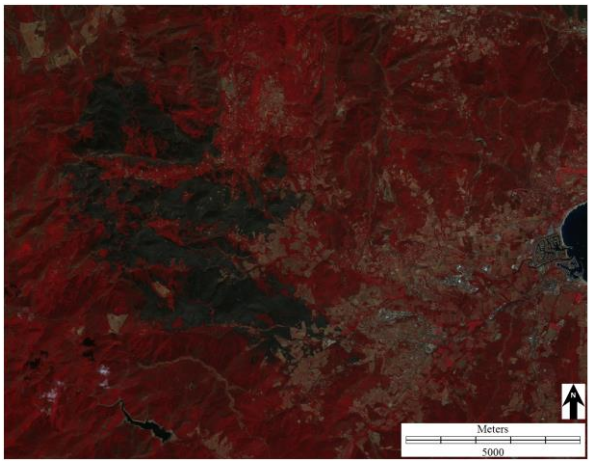
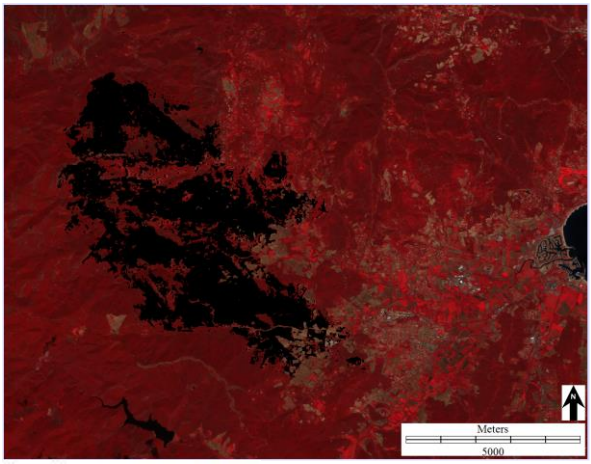


Figure 10:Image fausse couleur secteur 2: Le Cannet des Maures



Cicatrice du feu

Figure 11 : Cicatrice du feu secteur 2 : Le Cannet-des-Maures.

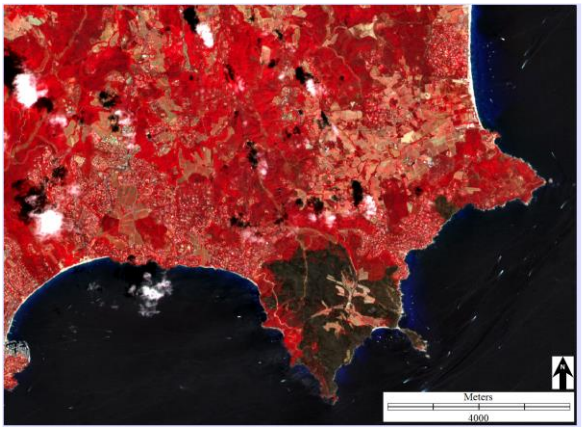
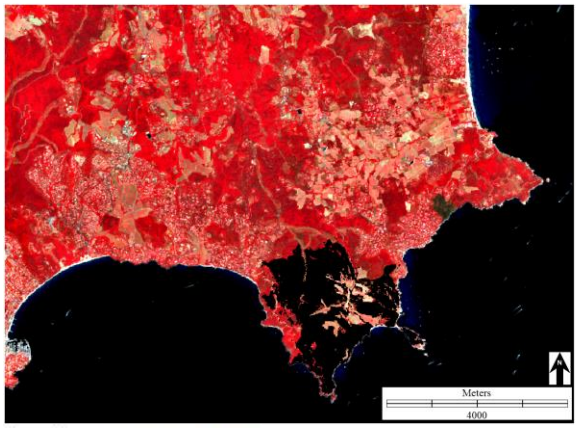


Figure 12: Image fausse couleur secteur 3: La-Croix-Valmer



Cicatrice du feu

Figure 13: Cicatrice du feu, secteur 3:La-Croix-Valmer

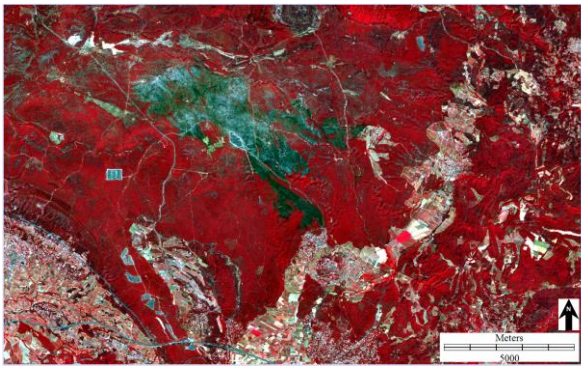


Figure 14: Image fausse couleur, secteur 4: Artigues

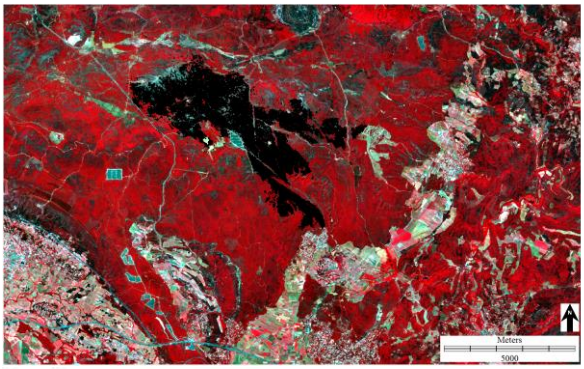


Figure 15:Cicatrice du feu, secteur 4: Artigues

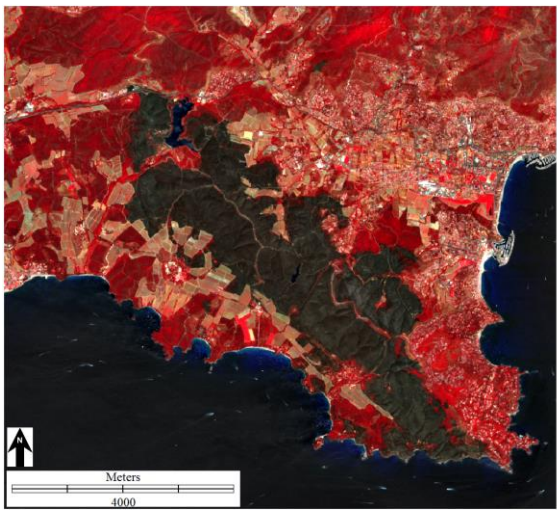


Figure 16: Image fausse couleur, secteur 5: La Londe-les-Maures

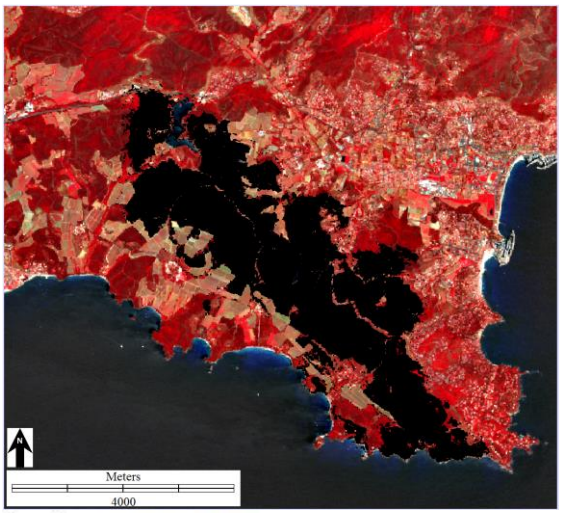


Figure 17 : Cicatrice du feu, secteur 5 : La Londe-les-Maures

4.2 La cartographie de l'occupation du sol.

Les Figures 18 à 27 présentées permettent d'observer la composition du territoire et la localisation des différents éléments d'occupation du sol. Premièrement, sur toutes les cartes les zones naturelles occupent la majorité du territoire. Ensuite viennent les espaces agricoles qui sont répartis dans les plaines alluviales et les vallons, laissant les collines occupées par les garrigues et forêts. Pour ce qui est de l'urbanisation, sur les zones de Vidauban (Figures 18 & 19), La Londe-les-Maures (Figures 26 & 27) et la Croix-Valmer (Figures 22 & 23), la bande littorale et une partie des plaines alluviales sont occupées de manière continue. A la Londe-les-Maures et La Croix-Valmer ce phénomène est présent à moins grande échelle grâce à la gestion particulière de sauvegarde des paysages mise en place sur le Cap Bénat et le Cap Lardier (Conservatoire du littoral, s.d.). Sur ces trois espaces, les incendies se sont répandus dans les zones naturelles jusqu'à la rencontre avec des zones mieux protégées où la quantité de combustibles était aussi plus faible : les zones agricoles, les zones urbanisées ou bien le bord de mer.

Pour ce qui est des secteurs du Cannet-des-Maures (Figures 20 & 21) et d'Artigues (Figures 24 & 25), la répartition de l'urbanisation semble différente, avec des zones urbaines

moins importantes et réparties de manière plus ponctuelle, séparées les unes des autres par des espaces naturels ou agricoles.

Grâce aux données de la BD bâti, on remarque que dans tous les secteurs d'étude un grand nombre de bâtiments sont situés hors de zones urbanisées. Ces bâtiments seront pris en compte dans les cartes de vulnérabilité car ils représentent des habitats dont l'interface avec les zones naturelles est importante, ce qui augmente leur vulnérabilité face aux risques. Dans ces secteurs, la périurbanisation et le mitage sont importants, rendant le processus de classification parfois complexe (Daligaux, 2001).

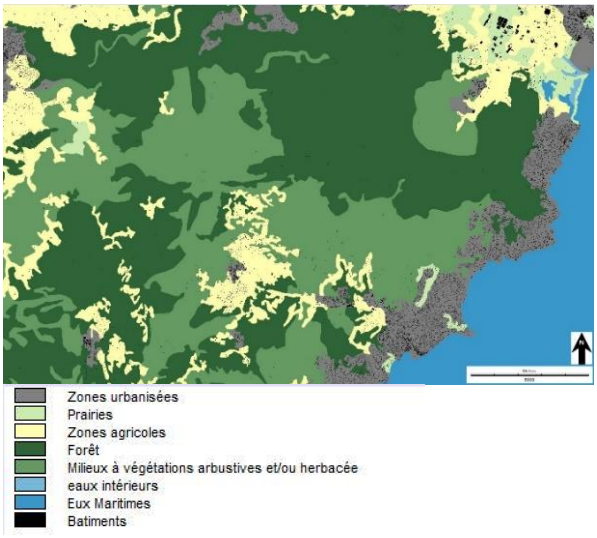


Figure 18:occupation du sol avant incendies, secteur de Vidauban.

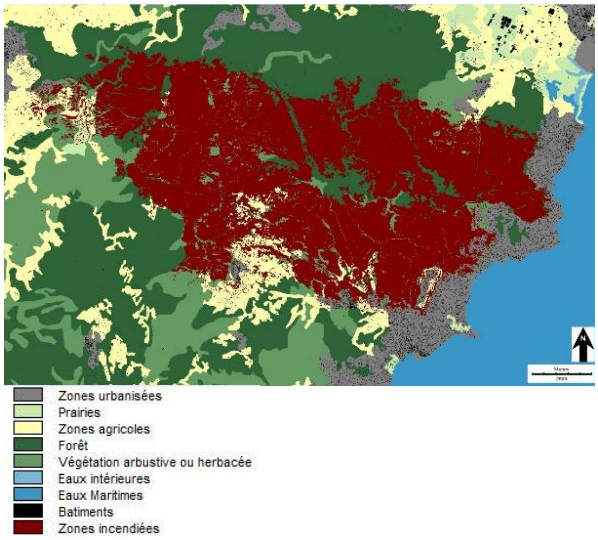


Figure 19: Occupation du sol après incendies, secteur de Vidauban

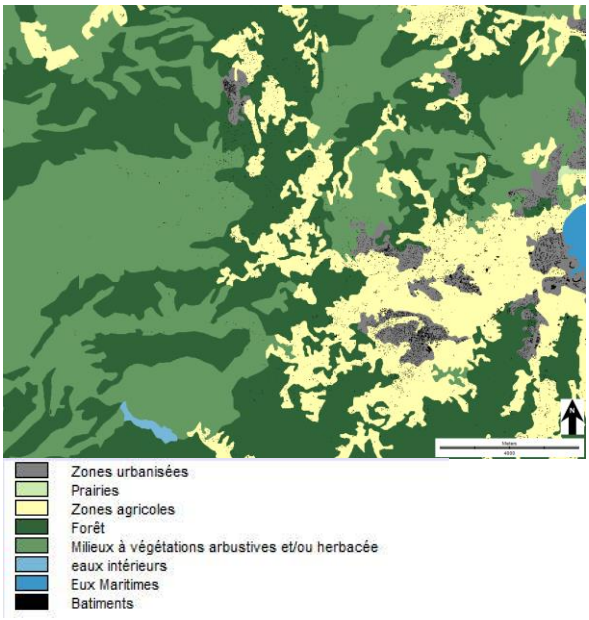


Figure 20: Occupation du sol avant incendie, secteur du Cannet-des-Maures.

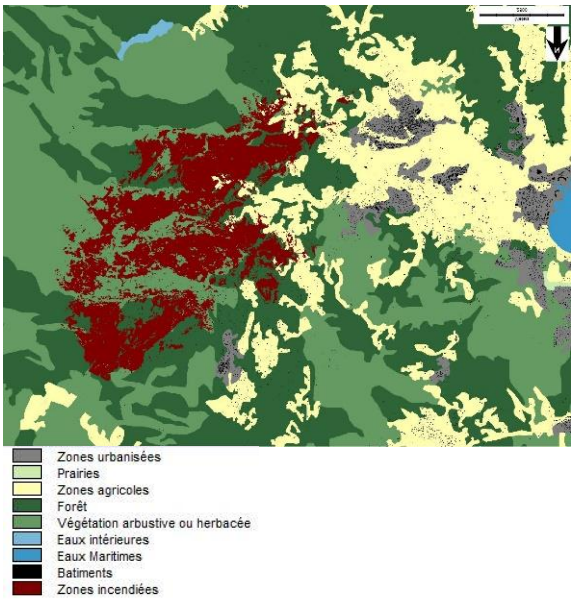


Figure 21 : Occupation du sol après incendie, secteur du Cannet-des-Maures.

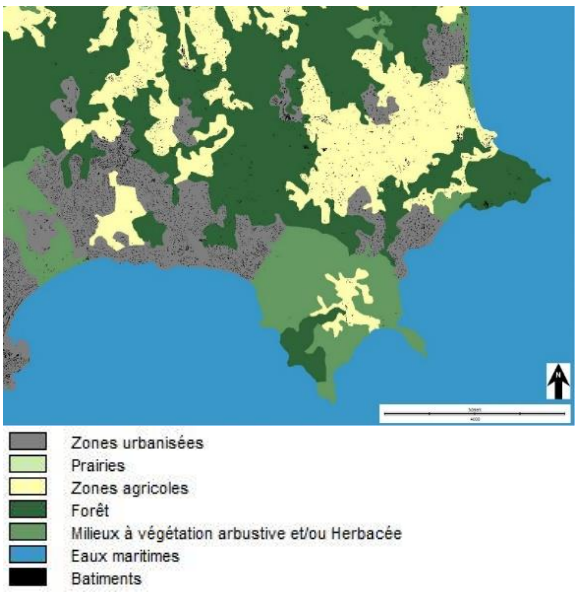


Figure 22:Occupation du sol avant incendie, Secteur de la Croix-Valmer.

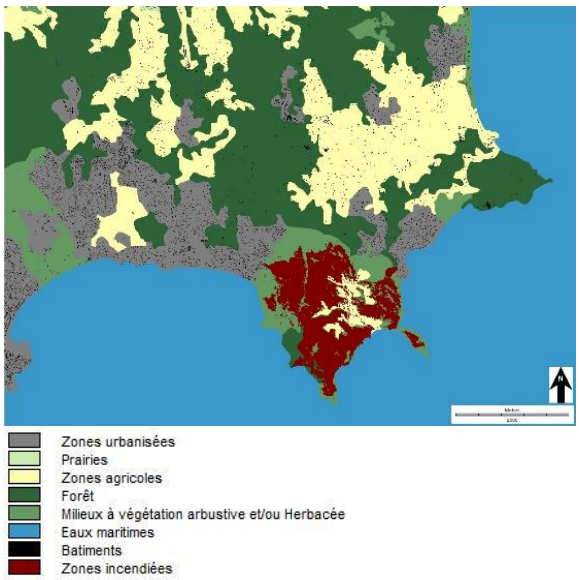


Figure 23: Occupation du sol après incendie, secteur de la Croix-Valmer.

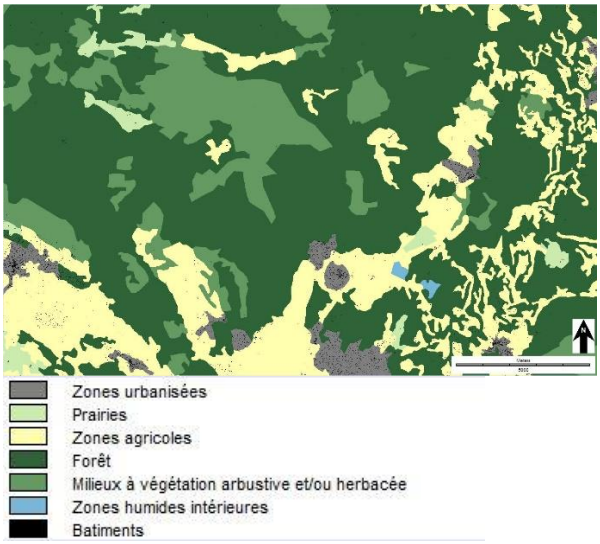


Figure 24: Occupation du sol avant incendie, secteur d'Artigues.

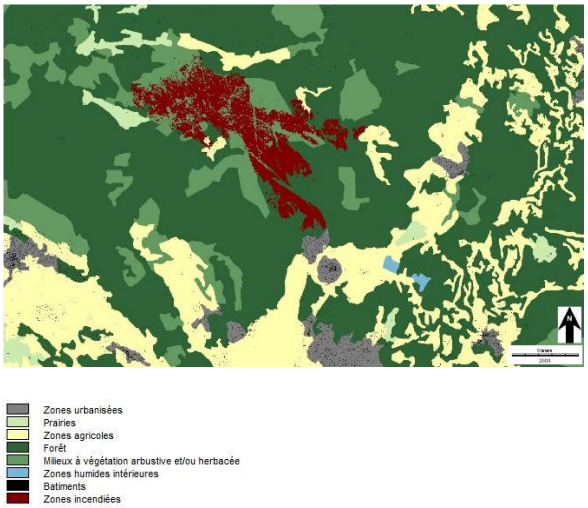


Figure 25: Occupation du sol après incendie, secteur d'Artigues.

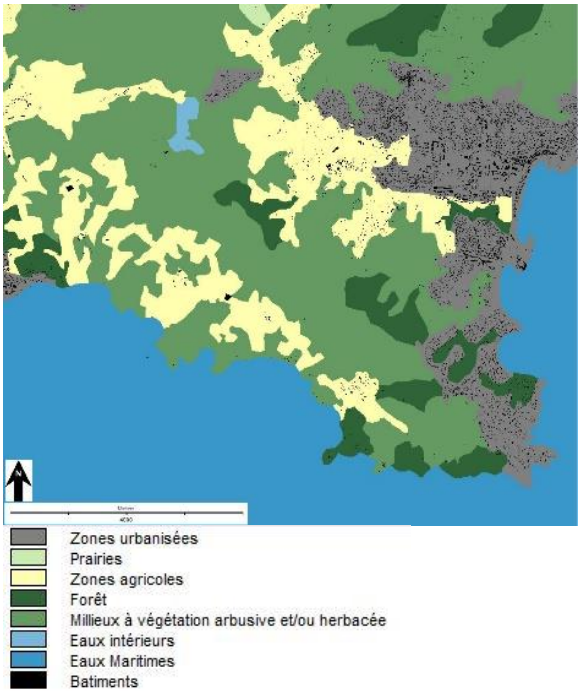


Figure 26: Occupation du sol, secteur de la Londe-les-Maures.

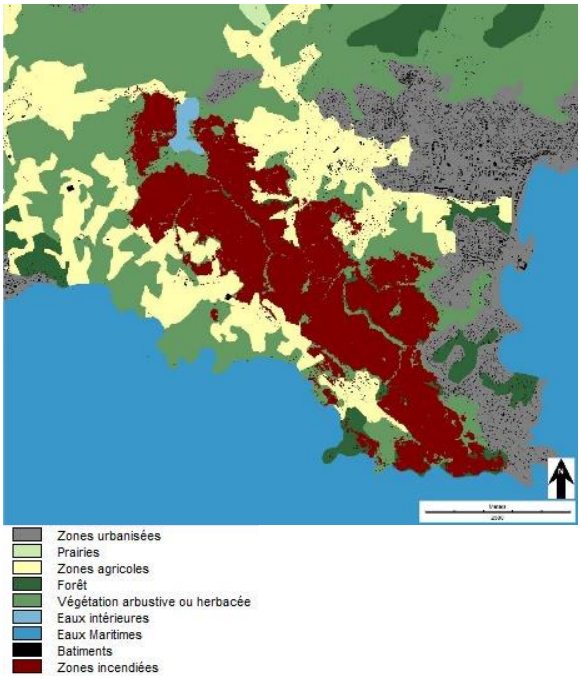


Figure 27: Occupation du sol après incendie, secteur de la Londe-les-Maures.

4.3 La cartographie de la vulnérabilité

La méthode de cartographie de la vulnérabilité aux inondations a permis de localiser dans chaque secteur d'étude quels étaient les espaces susceptibles d'être inondés, ainsi que ceux qui sont les plus vulnérables. Dans les Figures 28 à 32, on remarque la localisation des zones vulnérables dans les plaines alluviales, notamment près de l'embouchure des différents cours d'eau, mais aussi dans les espaces plats plus en altitude (zones de Vidauban (Figure 28) et d'Artigues (Figure 31)). La cartographie des zones inondables peut cependant comporter des erreurs induites par la fenêtre d'étude choisie. Des secteurs alimentés par des eaux de ruissellement provenant de zones hors de notre cadre d'étude ont des valeurs de ruissellement sous-estimées. Puisque ces zones sont peu concernées par l'incendie de forêt, cette déformation est sans importance.

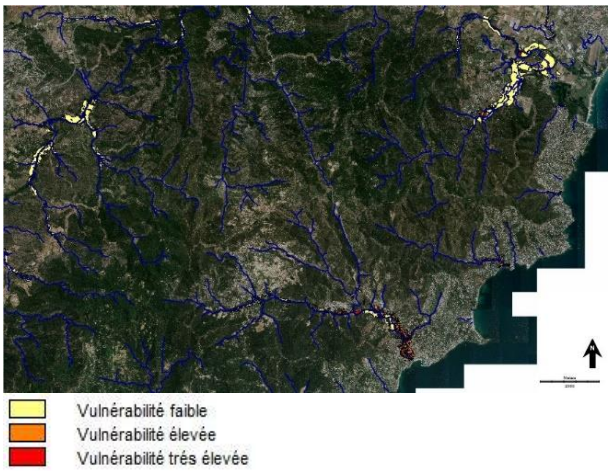


Figure 28 : Vulnérabilité aux inondations, secteur de Vidauban.

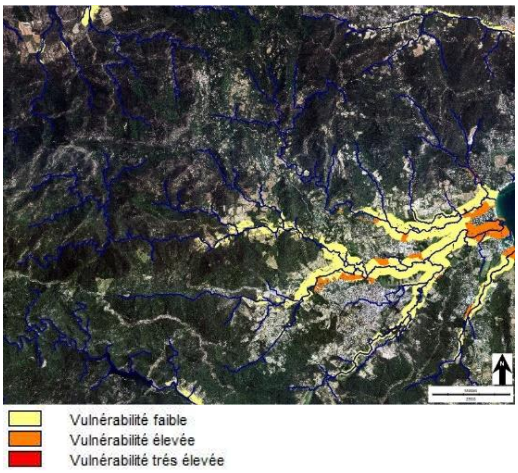


Figure 29: Vulnérabilité aux inondations, secteur du Cannet-des-Maures.

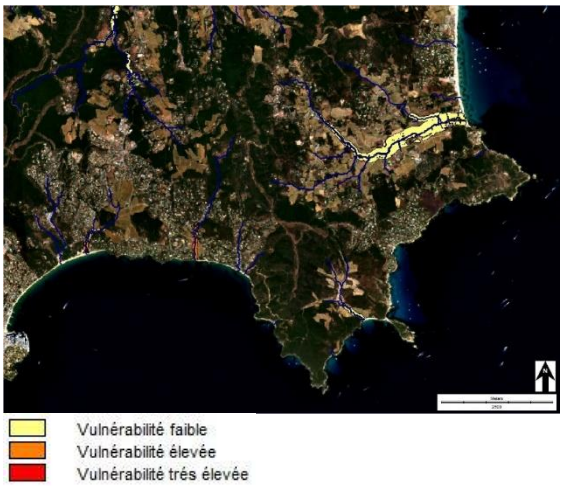


Figure 30:Vulnérabilité aux inondations, secteur de la Croix-Valmer

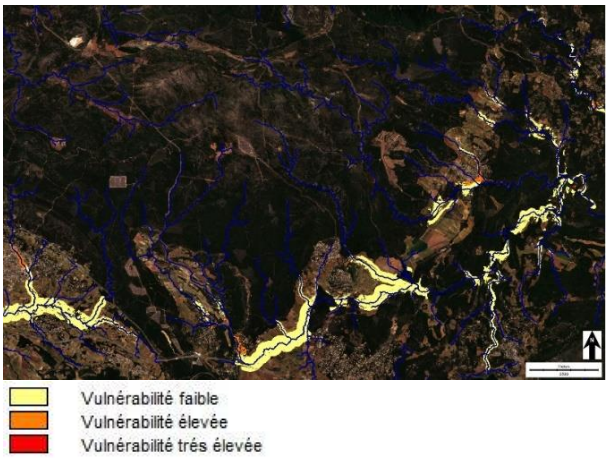


Figure 31: Vulnérabilité aux inondations, secteur d'Artigues.

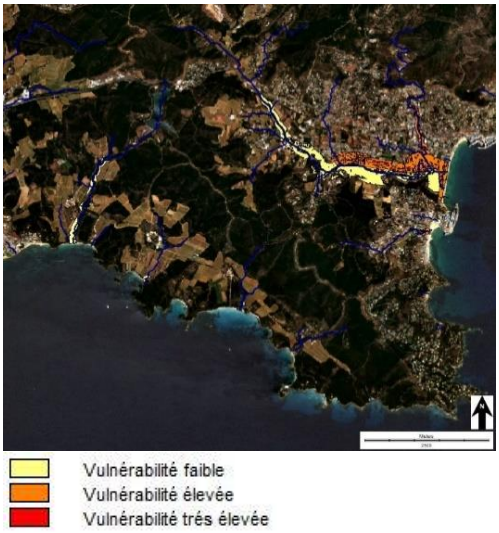


Figure 32: Carte de vulnérabilité aux inondations, secteur de La Londe-les-Maures.

La majeure partie des zones d'études n'est pas soumise au risque inondation : entre 1.7% et 4.2% seulement. Chaque espace a ses propres caractéristiques : par exemple, sur la commune du Cannet des Maures (Figure 29), 4.19% du territoire d'étude est vulnérable aux inondations, mais dans ces 4.19% se trouvent 17.43% des zones agricoles, 13.08% des zones urbaines, et 14.26% des bâtiments. Un autre exemple intéressant est celui de la Londe-les-Maures (Figure 32) où 15.56% des bâtiments sont vulnérables aux inondations.

Tableau 11 : Part de chaque type d'occupation du sol située en zone inondable.

Zones d'étude	Part vulnérable du territoire (%)	Part vulnérable de la zone agricole (%)	Part vulnérable de la zone urbanisée (%)	Part vulnérable des bâtiments (%)
Vidauban	1.69	9.87	2.46	5.56
Le Cannet-des-Maures	4.19	17.43	13.08	14.26
La Croix-Valmer	1.65	5.90	0.63	1.20
Artigues	2.84	12.71	2.15	5.33
La Londe-les-Maures	2.72	6.65	6.45	15.56

L'occupation du sol la plus représentée dans les zones vulnérables (Tableau 12) est celle des espaces agricoles (faiblement vulnérables) avec plus de 80% de la superficie, sauf pour la zone d'étude de la Londe-les-Maures où les espaces agricoles occupent 55.41% de la zone inondable. Ensuite viennent les zones urbanisées (fortement vulnérables), avec des parts très variables, allant de 2.30% à Artigues jusqu'à 42.80% à la Londe-les-Maures. Finalement viennent les bâtiments (très fortement vulnérables) qui occupent une part assez faible du territoire vulnérable : entre 0.20% à Artigues et 4.94% à Vidauban, mais ce sont aussi les espaces considérés comme les plus vulnérables et qui vont fortement influencer l'indice de vulnérabilité aux inondations post-incendie.

Tableau 12:Surfaces vulnérables

Zones d'étude	Surface de la zone vulnérable (ha)	Surfaces faiblement vulnérables (ha)	Surfaces fortement vulnérables (ha)	Surfaces très fortement vulnérables (ha)	Part des surfaces faiblement vulnérables (%) (Agricole)	Part des surfaces fortement vulnérables (%) (Urbain)	Part des surfaces très fortement vulnérables (%) (Bâtiments)
Vidauban	606.25	499.96	76.79	30.00	82.40	12.66	4.94
Le Cannet-des-Maures	906.76	763.88	110.87	32.00	84.24	12.23	3.53
La Croix-Valmer	111.33	101.84	7.84	1.65	89.39	6.91	3.70
Artigues	882.85	808.46	19.06	5.33	97.50	2.30	0.20
La Londe-les-Maures	165.35	84.51	65.28	15.56	55.41	42.80	1.78

Parmi ces zones vulnérables aux inondations, toutes ne sont pas impactées par l'incendie. Par exemple à la Croix-Valmer, seul un cours d'eau prend source dans la zone incendiée ; à Vidauban, le Cannet et Artigues, seuls les cours d'eau situé à l'Est de l'incendie sont impactés par le feu ; à la Londe-les-Maures, les cours d'eau de part et d'autre de l'incendie sont touchés. Le nombre et la localisation des cours d'eau qui sont touchés par la présence de l'incendie dépendent de la topographie et la forme des bassins versants.

4.4 L'impact de l'incendie sur le ruissellement

Les différents relevés effectués ont permis d'extraire de nombreuses informations sur les bassins versant et l'évolution du ruissellement et les relations entre les incendies et le ruissellement ont pu être quantifiées. Les Figures 33 à 38 ci-dessous rassemblent les relevés à l'entrée de la zone vulnérable (rouge) et les relevés situés à 1 km en aval (bleu).

D'après les différentes régressions effectuées seules deux relations sont significatives. La Figure 33 illustre une évolution du débit (après feu – avant feu) en m^3s^{-1} dépendante de la superficie brulée en ha.

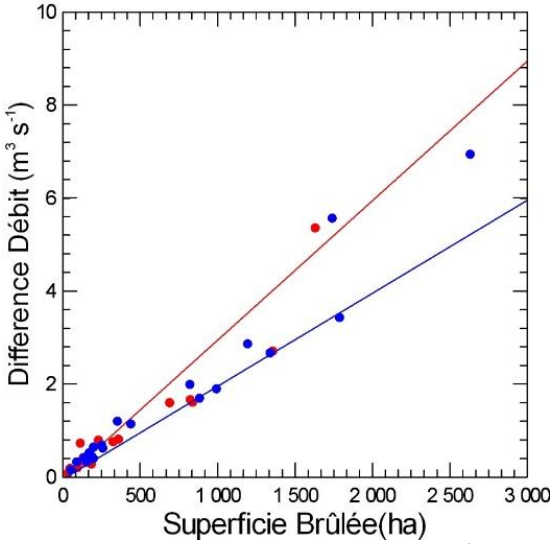


Figure 33 : Graphique représentant l'augmentation du débit en m^3s en fonction de la surface brulée en ha

La deuxième relation significative est celle de l'augmentation du débit en % en fonction de la superficie brulée en % (Figure 34).

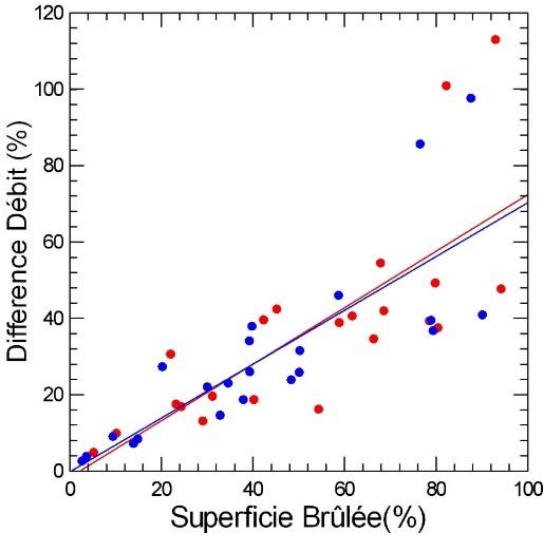


Figure 34 : Graphique représentant l'augmentation du débit en % en fonction de la part du bassin versant brulée.

Comme le montre les Figures 35 et 36, la relation entre l'augmentation du débit en m^3s^{-1} et la superficie brulée en %, ainsi que la relation entre l'augmentation du débit en % et la superficie brulée en hectares ne sont pas statistiquement significatives (Figure 37).

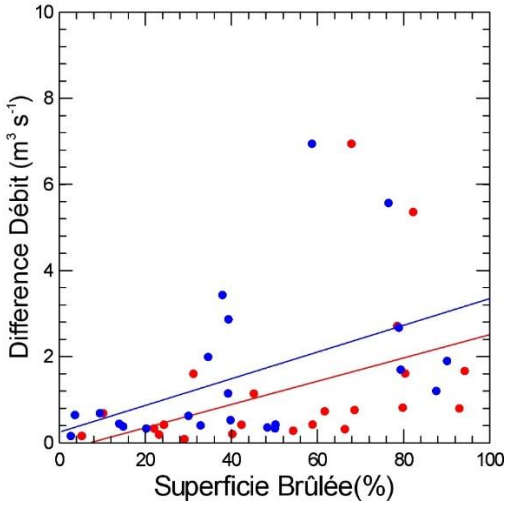


Figure 35 : Graphique représentant la différence de débit en m^3s et fonction de la part du bassin versant brulée.

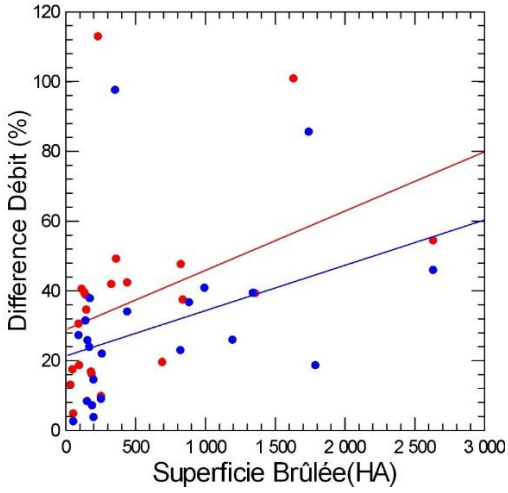


Figure 36: Graphique représentant la différence de débit en % en fonction de la superficie brulée en ha.

Sur la Figure 38, on peut aussi remarquer qu'il n'y a pas de relation entre l'augmentation du débit en m^3s^{-1} et son augmentation exprimée en pourcentage. Il est donc difficile à partir de ces données de mettre en relation de manière quantitative l'augmentation du débit et l'indice de vulnérabilité. A la suite de cette première exploration des résultats, il a été décidé d'effectuer l'analyse des zones vulnérables uniquement sur les cours d'eau dont l'augmentation du débit était supérieure à 20%.

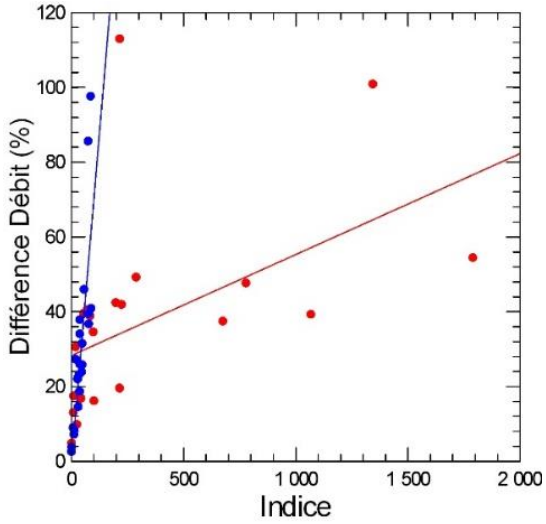


Figure 37: Graphique représentant la différence de débit en %, en fonction de l'indice (Produit de la part du bassin versant et de la surface brulée).

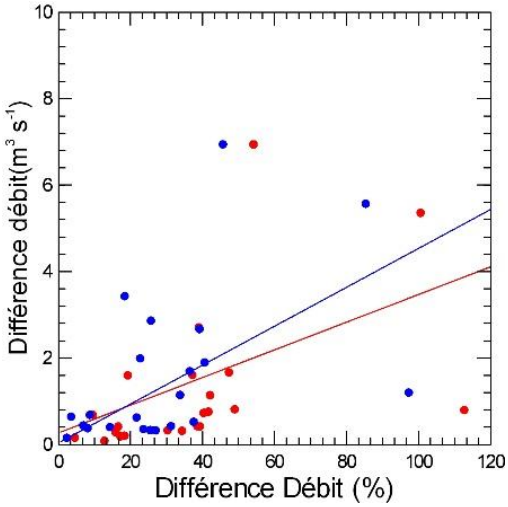


Figure 38: Graphique représentant la différence de débit en m^3s^{-1}, en fonction de la différence de débit en %.

4.5 L'indice de vulnérabilité aux inondations post-incendies.

La méthode d'évaluation de la vulnérabilité aux inondations post-incendie permet de hiérarchiser le territoire et de définir les espaces à protéger en priorité. Dans le Tableau 13, il est possible de comparer la vulnérabilité des différentes zones sélectionnées sur tous les incendies étudiés du département.

Tableau 13 : Vulnérabilité aux inondations post-incendies dans le département du Var

Zones d'étude	Numéro de zone	Surface totale	Surface agricole	Surface urbanisée	Surface bâtie	Indice de vulnérabilité.
Vidauban	4	169.56	162.37	3.29	3.90	1105.55
Le Cannet-des-Maures	9	104.01	103.00	0.00	1.01	565.50
Vidauban	2	14.15	0.00	12.34	1.81	460.70
Vidauban	6	81.62	81.38	0.00	0.24	418.90
Vidauban	1	18.34	9.77	6.11	2.46	355.15
Artigues	12	55.78	55.75	0.00	0.03	280.25
Le Cannet-des Maures	10	28.09	27.13	0.00	0.96	183.65
Vidauban	3	2.34	0.00	1.98	0.36	77.40
Vidauban	5	7.00	6.15	0.00	0.85	73.25
Artigues	13	13.65	13.65	0.00	0.00	68.25
La Londe-les-Maures	16	2.03	0.00	1.90	0.13	63.50
Vidauban	7	5.88	4.93	0.88	0.07	54.55
La Croix-Valmer	11	4.14	4.10	0.00	0.04	22.50
La Londe-les-Maures	17	1.68	1.42	0.00	0.26	20.10
La Londe-les-Maures	15	0.82	0.61	0.20	0.01	9.55
La Londe-les-Maures	14	1.25	1.25	0.00	0.00	6.25
Le Cannet-des-Maures	8	0.77	0.75	0.00	0.02	4.75

Les incendies de Vidauban et du Cannet-des-Maures sont ceux qui comportent les zones les plus vulnérables avec un maximum pour Vidauban de 1105.55, loin devant les autres. Ces secteurs ont les surfaces en zones potentiellement inondables les plus importantes. La différence se fait ensuite sur la surface des zones urbanisées ou bâties. Par exemple, la zone 2, située dans le secteur d'étude de Vidauban, a une surface totale de 14.15 ha, dont 87% sont des surfaces urbanisées et 1.81 ha sont des bâtiments (troisième plus grande surface bâtie parmi les zones). La présence de cette surface plus vulnérable explique sa forte vulnérabilité en cas d'inondation. Les zones situées sur le secteur de la Londe-les-Maures font partie des plus petites, et donc des moins vulnérables. Les surfaces agricoles y sont majoritaires, mais restent de petites surfaces comparées aux autres zones d'étude. Ce sont aussi des espaces où il y a peu, voire pas, d'urbanisation et de bâtiments.

C'est sur l'incendie de Vidauban (Tableau 14 & Figure 39) que se situe le plus grand nombre de zones vulnérables, Celles-ci se répartissent sur des grandes surfaces autour de l'incendie. Les zones 3, 5, et 7, qui sont les plus petites, apparaissent comme peu vulnérables avec des valeurs de vulnérabilité entre 54 et 78. Les zones 1 et 2 sont composées de peu de surfaces agricoles et une plus grande part d'espaces urbanisés et bâtis. La zone 4 se détache des

autres, elle est la plus grande et la plus vulnérable, elle contient à la fois de grandes surfaces agricoles et des grands espaces urbanisés et bâtis. La zone 6 se compose de grands espaces agricoles essentiellement (81.38 ha) pour une faible part de bâti (2400 m²). Sa grande surface en fait la 3ème zone la plus vulnérable du secteur.

Tableau 14: Vulnérabilité aux inondations post-incendies sur le secteur de Vidauban.

Incendie	N° de Zone	Surface totale (ha)	Surface agricole (ha)	Surface urbanisée (ha)	Surface bâtie (ha)	Indice de vulnérabilité
Vidauban	1	18.34	9.77	6.11	2.46	355.15
	2	14.15	0.00	12.34	1.81	460.70
	3	2.34	0.00	1.98	0.36	77.40
	4	169.56	162.37	3.29	3.90	1105.55
	5	7.00	6.15	0.00	0.85	73.25
	6	81.62	81.38	0.00	0.24	418.90
	7	5.88	4.93	0.88	0.07	54.55

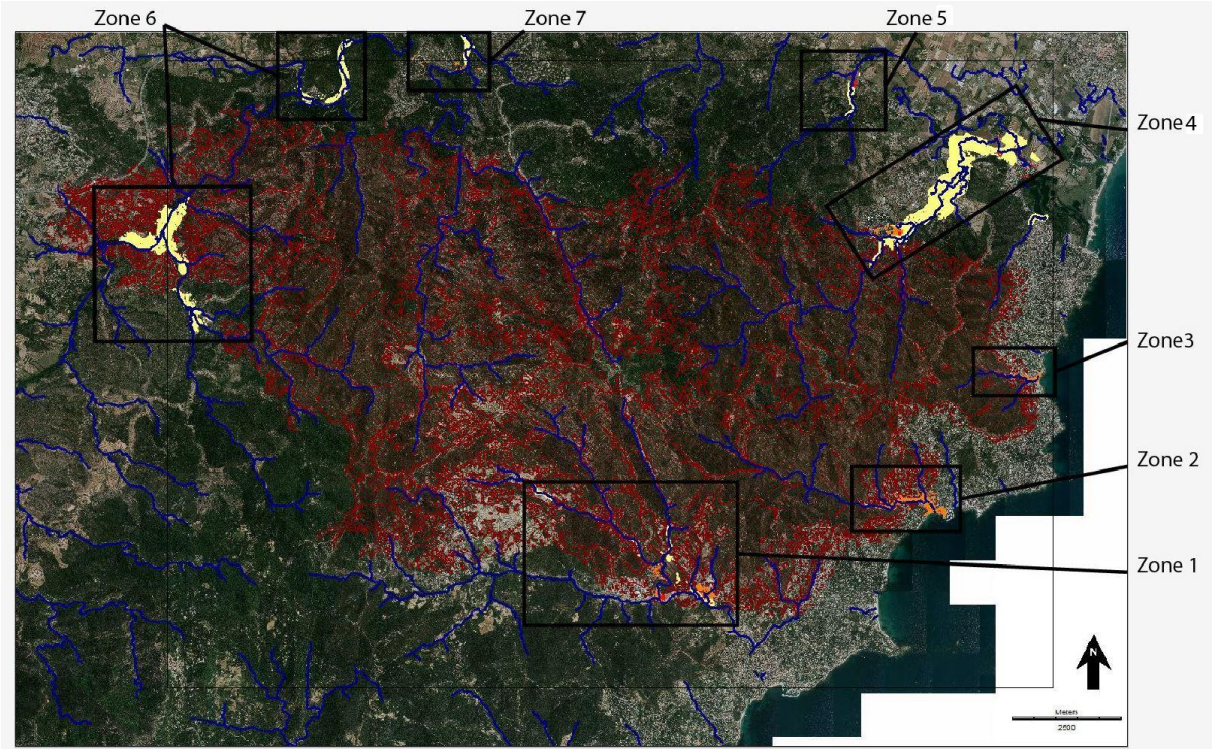


Figure 39: Catre de localisation des zones vulnérables aux inondations post-incendie sur le secteur de Vidauban.

Sur le secteur du Cannet-des-Maures (Tableau 15, Figure 40), la vulnérabilité est plus hétérogène, il existe 3 zones différentes, composées très majoritairement d'espaces agricoles. Les deux zones les plus vulnérables se trouvent sur les rives des affluents de la Giscle.

Tableau 15 : Vulnérabilité aux inondations post-incendies sur le secteur du Cannet-des-Maures.

Incendie	N° de Zone	Surface totale (ha)	Surface agricole (ha)	Surface urbanisée (ha)	Surface bâtie (ha)	Indice de vulnérabilité
Le Cannet-des-Maures	8	0.77	0.75	0.00	0.02	4.75
	9	104.01	103.00	0.00	1.01	565.50
	10	28.09	27.13	0.00	0.96	183.65

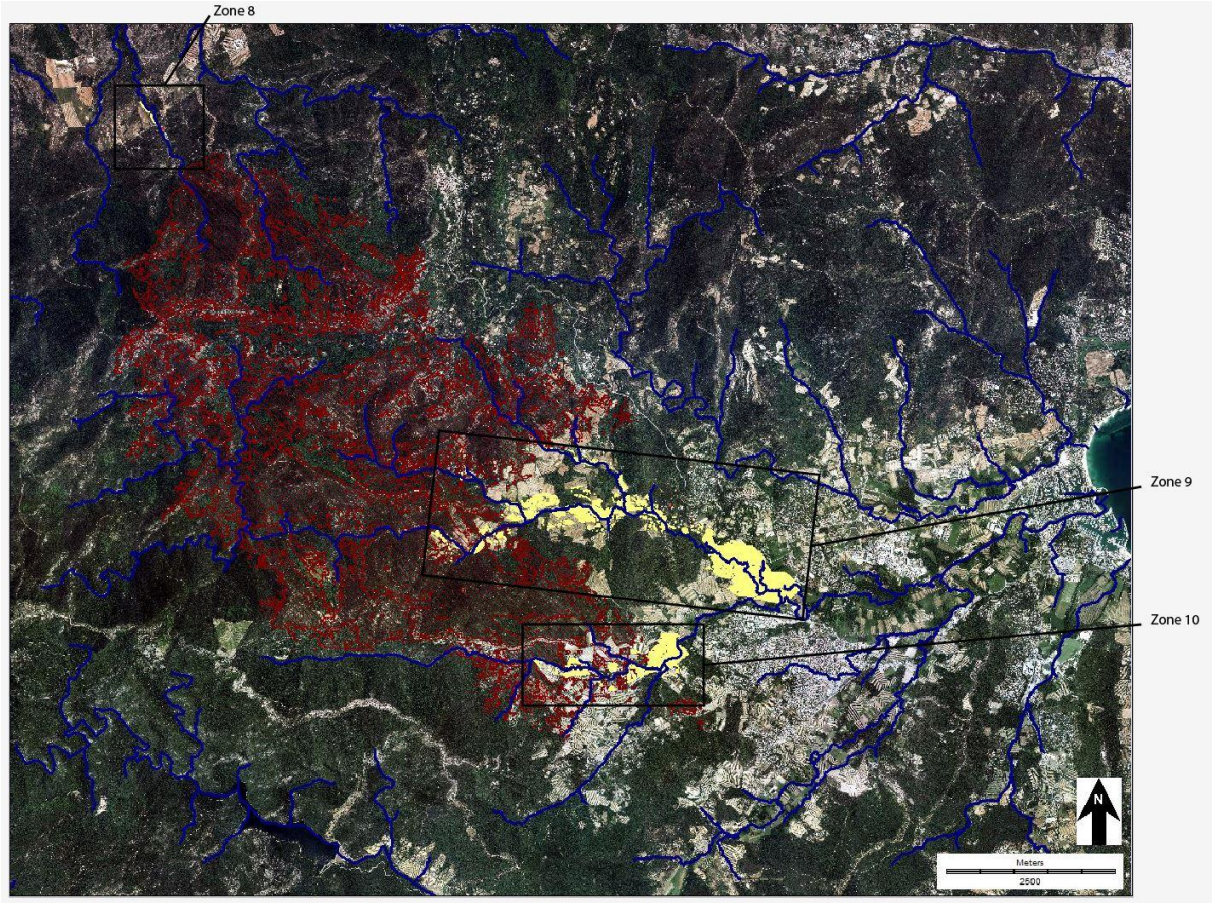


Figure 40 : Carte de localisation des zones vulnérables aux inondations post-incendie sur le secteur du Cannet-des-Maures.

Sur le site de la Croix-Valmer (Tableau 16, Figure 41), les surfaces incendiées sont réduites, ainsi un seul bassin versant a été touché par l'incendie. Une zone vulnérable a pu être relevée, d'une surface de 4.14 ha. Elle est composée en majorité de terrains agricoles, et comporte seulement 400 m^2 de surface bâtie.

Tableau 16: Vulnérabilité aux inondations Post-incendies sur les secteurs de la Croix-Valmer

Incendie	N° de zone	Surface totale	Surface agricole	Surface urbanisée	Surface bâtie	Indice de vulnérabilité
La Croix-Valmer	11	4.14	4.10	0.00	0.04	22.50

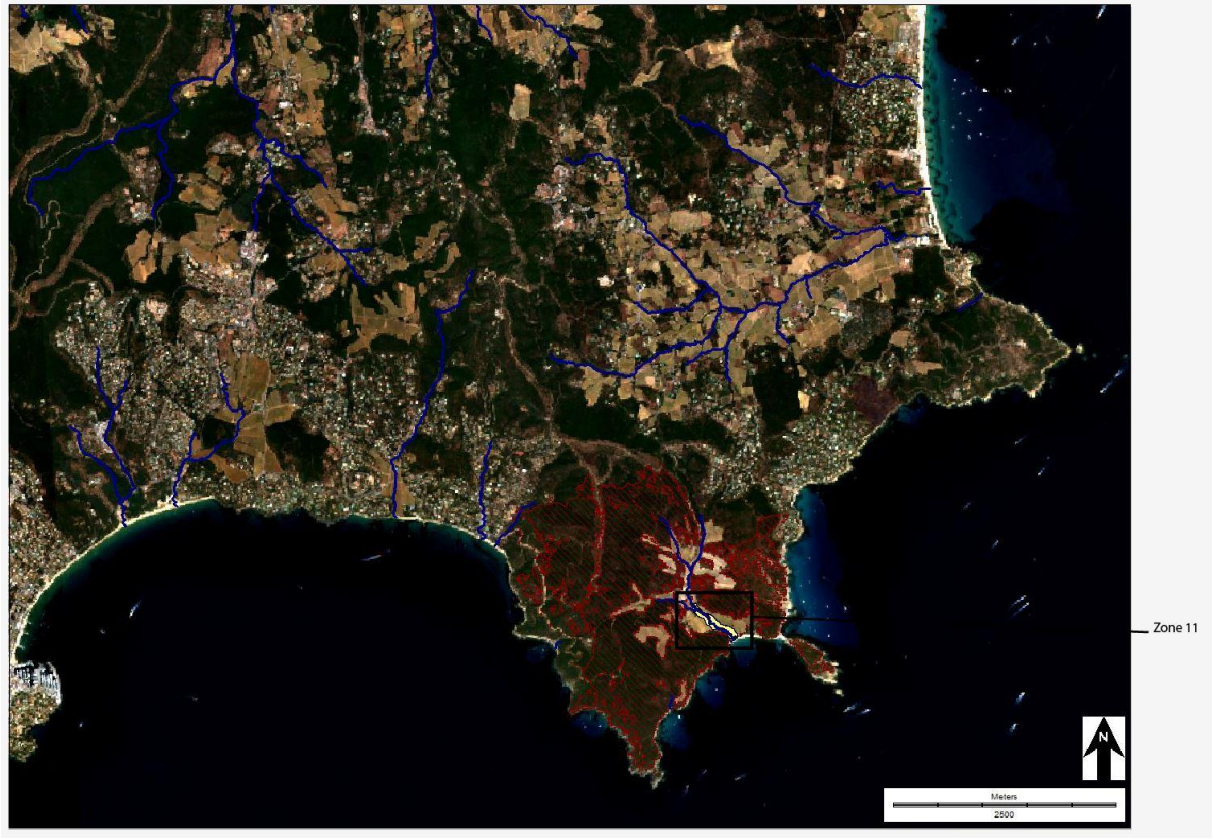


Figure 41 : Localisation de la zone vulnérable aux inondations post-incendies sur le secteur de la Croix-Valmer.

Le secteur d'Artigues (Tableau 17 & Figure 42) comporte au sud des terrains incendiés deux zones vulnérables. Celles-ci sont composées exclusivement d'espaces agricoles : dans la zone numéro 12 se trouvent 300 m^2 de surface bâtie. Les surfaces vulnérables étant importantes l'indice de vulnérabilité est assez fort (250.25).

Tableau 17:Vulnérabilité aux inondations post-incendies sur le secteur d'Artigues.

Incendie	N° de Zone	Surface totale	Surface agricole	Surface urbanisée	Surface bâtie	Indice de vulnérabilité
Artigues	12	55.78	55.75	0.00	0.03	250.25
	13	13.65	13.65	0.00	0.00	68.25

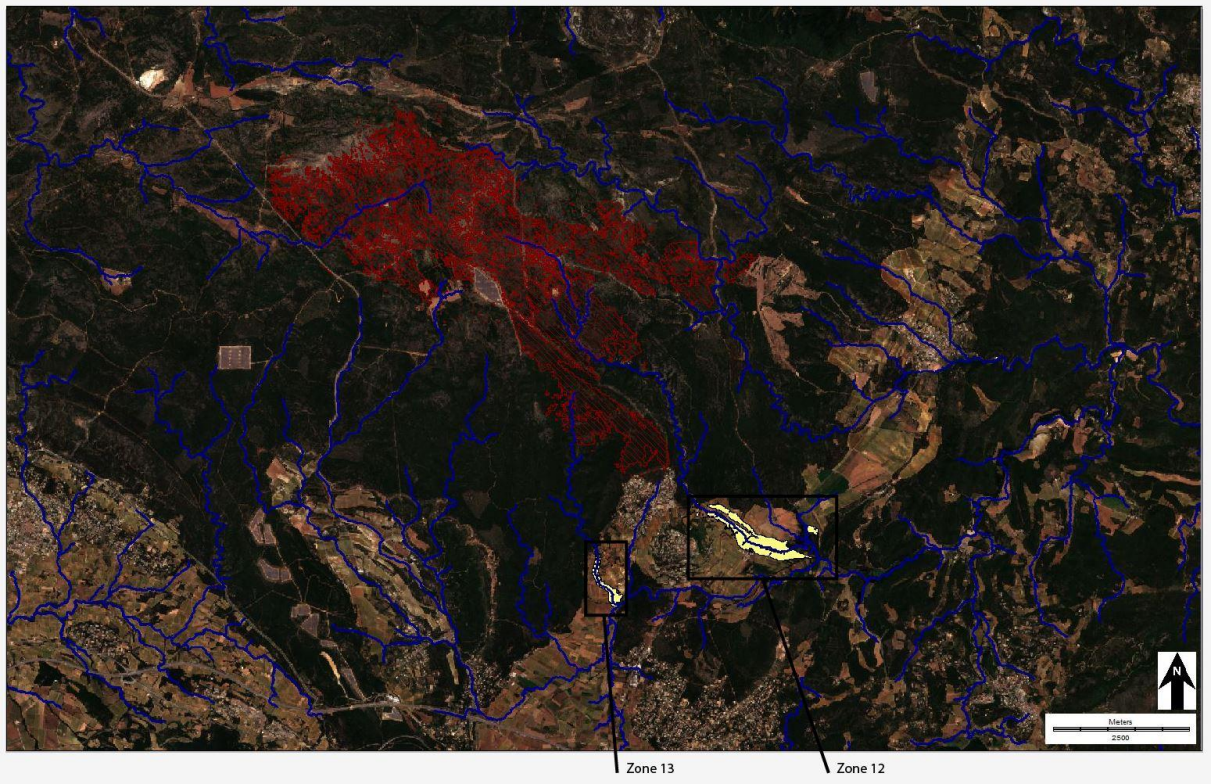


Figure 42 : Carte de localisation de zones vulnérables aux inondations post-incendies sur le secteur d'Artigues:

Le secteur de la Londe-les-Maures (Tableau 18 & Figure 43) comporte 4 zones vulnérables avec de fortes différences en termes d'occupation du sol. La zone 14, composée à 100% de surface agricole, est la moins vulnérable. La zone numéro 15 est la plus petite, mais on y trouve des surfaces urbanisées et bâties, ce qui en fait une zone plus vulnérable que la précédente. La zone numéro 16 est la plus vulnérable du secteur, celle-ci est composée d'espaces urbanisés et bâtis seulement. Finalement la zone 17 vient au deuxième rang avec la plus grande surface agricole et 2600 m^2 de bâti. Toutes ces zones vulnérables sont réparties de part et d'autre de l'incendie qui a touché de nombreux bassins versants.

Tableau 18: Vulnérabilité aux inondations post-incendies sur le secteur de la Londe-les-Maures

Incendie	N° de Zone	Surface totale	Surface agricole	Surface urbanisée	Surface bâtie	Indice de vulnérabilité
La Londe-les-Maures	14	1.25	1.25	0.00	0.00	6.25
	15	0.82	0.61	0.20	0.01	9.55
	16	2.03	0.00	1.90	0.13	63.5
	17	1.68	1.42	0.00	0.26	20.1

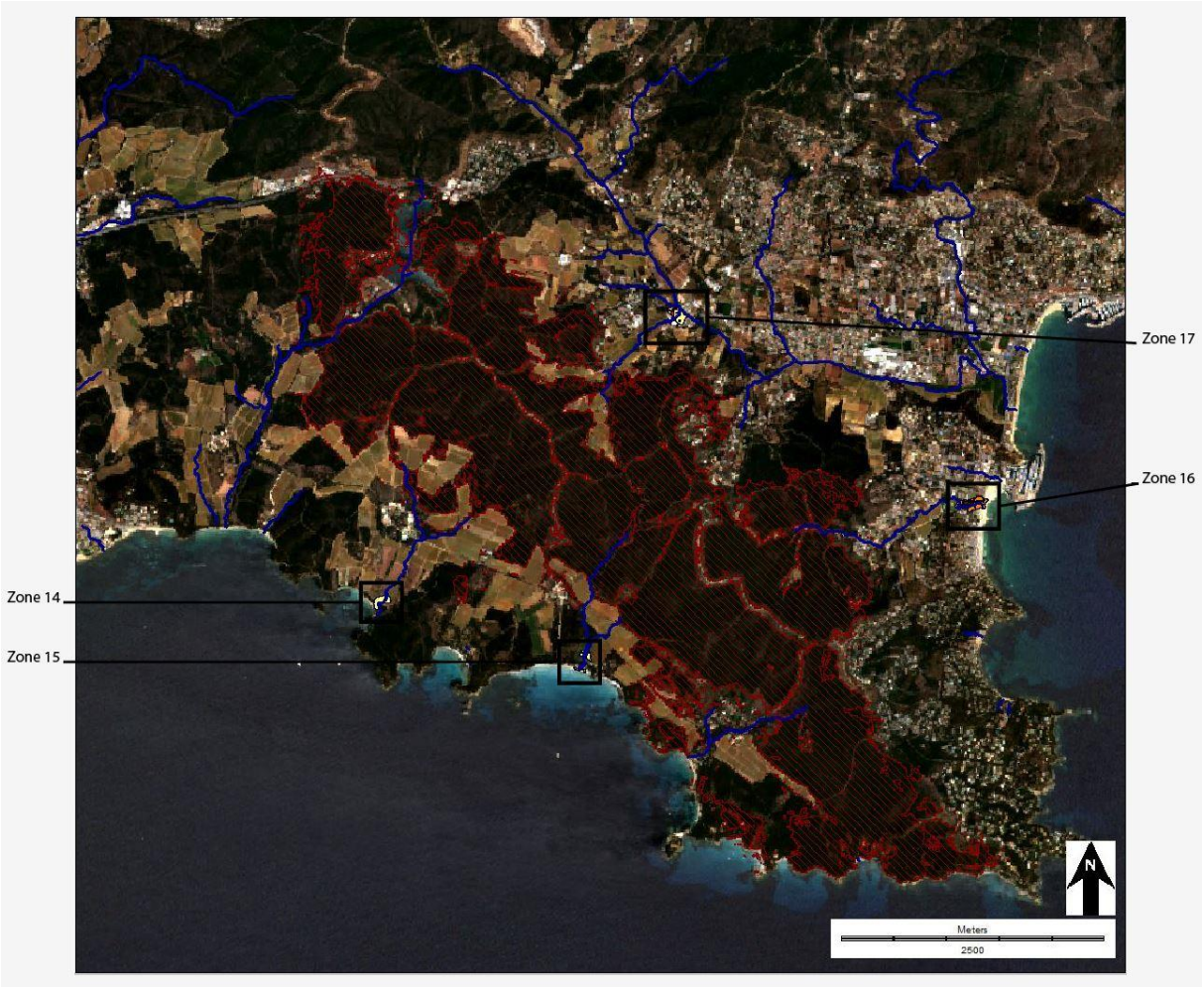


Figure 43: Carte de localisation des zones vulnérables aux inondations post-incendies sur le secteur de La Londe-les Maures.

5 Discussion

Les résultats obtenus ci-dessus montrent bien une augmentation de débit dans les cours d'eau en aval de la zone incendiée, mais les différences observées étaient relativement peu importantes. En effet il semblerait que sur tous les bassins versants observés, l'impact de l'incendie sur le ruissellement modélisé était relativement faible. Des corrélations fortes entre augmentation du débit et surface brûlée / pourcentage du bassin versant incendié ont été observées. La relation entre augmentation du débit et superficie parcourue par le feu demeure complexe et n'a pas le même sens si l'augmentation est mesurée en pourcentage ou en valeur absolue. Par exemple, un des cours d'eau a présenté une augmentation du débit de 112% (augmentation la plus significative), mais en m^3s^{-1} l'augmentation du débit était de seulement 0.78 m^3s^{-1}. A l'inverse, un autre cours d'eau a montré une augmentation du débit relatif moins importante avec plus 54% de ruissellement, ce qui correspondait à une augmentation du ruissellement de presque 7 m^3s^{-1} (voir annexe pour le détail de tous les relevés). Il semblerait que pour qu'un incendie ait un impact réel sur le risque inondation, il faut à la fois que l'incendie soit important, que le bassin versant soit de grande taille, et que la surface parcourue par le feu occupe un pourcentage important du bassin versant.

La démarche décrite dans ce rapport a permis de définir des zones inondables, et de les hiérarchiser en fonction de leur vulnérabilité. La limite de susceptibilité aux inondations a été définie à partir des résultats de l'augmentation des débits. Il a été décidé que toutes les zones inondables situées à proximité d'un cours d'eau dont l'augmentation du débit est supérieure ou égale à 20%, sont susceptibles d'être touchés par une inondation dû à une augmentation du ruissellement induite par l'incendie. Dans ces zones, des indices de vulnérabilité ont été appliqués aux différents types d'occupation du sol. N'ayant pas accès à des bases de données sur la valeur de dégâts d'inondations, les indices ont été choisis de manière subjective. Les indices ont été inspirés des travaux réalisés par Mathy (2018) lors d'un stage au laboratoire de l'UMR 7300 ESPACE. Elle y fait une présentation des éléments à prendre en compte lors de la réalisation d'un indice de vulnérabilité et y présente aussi une graduation de la vulnérabilité. Ainsi il a été possible de simplifier ces travaux et de créer des indices correspondant aux données disponibles.

Il a été considéré que les espaces naturels ne sont pas vulnérables aux inondations car ceux-ci ne sont pas exploités et n'ont donc pas de valeur économique importante ; de plus les espaces naturels ont une résilience forte face aux inondations. Les zones agricoles sont considérées comme vulnérables, car en cas d'inondation les dégâts peuvent être multiples : destruction de matériaux, d'infrastructures ou encore de récoltes, voire même arrachement des pieds de vigne. Dans les zones d'étude, il y a de nombreuses terres agricoles composées en majorité de vignes, qui une fois détruites ou abimées mettent plusieurs années à retrouver leurs rendements initiaux, l'inondation a donc un impact économique sur plusieurs années. Pour ce qui est des zones urbanisées, leurs coefficients de vulnérabilité est bien plus important : il a été considéré que la présence de biens et d'infrastructures était plus importante et représentait un risque de pertes économiques considérables. Ce sont aussi des espaces où les densités de population sont importantes et donc où la probabilité de dommages corporels augmente. La dernière catégorie d'occupation du sol, les bâtiments, a été considérée comme la plus vulnérable car ils représentent un capital économique important, ce sont aussi les lieux où se trouve la plus grande densité de population ; ainsi, la vulnérabilité humaine et économique y sont les plus fortes.

De manière générale, après analyse des résultats finaux, les valeurs d'indice attribuées aux différents types d'occupation du sol, multipliées par la surface en hectare semblent donner un résultat satisfaisant, les surfaces qui ont le plus de zones bâties ou urbanisées sont mises en valeur et apparaissent toujours parmi les plus vulnérables. Dans certains cas, les zones agricoles vastes représentent une grande vulnérabilité que de petites zones bâties. Les indices créés permettent avant tout de hiérarchiser les différentes zones à protéger. L'objectif de l'indice ici était de créer une méthode applicable par chaque commune qui permettrait de hiérarchiser les différents bassins versants touchés par un feu de forêt et de définir lesquels sont à protéger du risque inondation post-incendie en priorité.

6 Conclusion

La création d'un indice de vulnérabilité fait partie des outils qui peuvent aider à la gestion des territoires et à la prise décision. Dans un département tel que celui du Var où le risque de feu de forêt est des plus importants de France, il est important de rappeler que la gestion des espaces post-incendies représente un enjeu peut-être aussi important que celui de la prévention et la gestion du risque d'incendie en lui-même. En effet les terrains parcourus par un feu de forêt demandent des interventions particulières telles que la mise en place d'infrastructures de lutte contre le ruissellement, l'érosion, ou bien la réhabilitation des espaces forestiers. Ce sont des interventions coûteuses pour lesquelles il faut définir des priorités, c'est ainsi que

l'utilisation d'un indice peut aider à les définir. Dans ce projet, l'objet était la création d'un indice de vulnérabilité au ruissellement post-incendie, utilisable par les collectivités afin de faciliter leur gestion des terrains incendiés. On peut relever dans ce projet que la mesure exacte d'augmentation post incendie du niveau d'eau dans les cours d'eau est un élément difficile à évaluer de manière précise. Il a tout de même été possible d'imaginer quels étaient les caractéristiques favorisant la susceptibilité aux inondations post-incendie. Dans un deuxième temps la définition d'un indice de vulnérabilité a pu être produite, basée sur des données d'occupation, il permet de rendre compte des différents territoires à protéger. Finalement en croisant l'indice de vulnérabilité aux inondations et les informations d'augmentation de débit dans nombreux les bassins versant touchés par les incendies, il est possible de créer une hiérarchie entre les bassins versants. Ainsi que de mettre en valeur les zones à protéger en priorité, où les ouvrages de gestion des eaux sont à mettre en place. La création d'un tel indice permet d'accompagner au mieux l'intervention de spécialistes sur terrain comme cela se fait aujourd'hui. Il permettrait de donner une information réelle de la composition du bassin versant et de l'évolution des débits possibles dans celui-ci.

Un indice du même type pourrait être créé dans un objectif de protection face aux autres dégâts que provoquent le ruissellement (érosion et dépôt), mettant en valeur les différents types de terres agricoles ou autre infrastructures susceptibles d'être touchée par l'érosion ou des dépôts.

7 Annexes

Zone d'étude	ID	Q avant incendie	Q après incendie	Différence (m^3/s)	Différence (%)	Surface du bassin versant (ha)	Surface brulée (ha)	Surface brulée (%)	Surface brulée (ha) * Surface brulée (%) / 100
Vidauban	23	4.623755	6.507927	1.8841	40.74	1104.48	996.91	90.26057511	899.82
	24	6.4955	12.04928	5.553766	85.50153	2274.88	1743.68	76.64931777	1 336.52
	25	4.5952	6.2775	1.6823	36.6103	1115.91	886.97	79.48400857	705.00
	26	6.7545	9.410159	2.65563	39.31628	1700.41	1343.98	79.03858481	1 062.26
	27	18.45294	21.86973	3.41679	18.51624	4708.01	1791.89	38.06045442	682.00
	28	15.11785	22.04706	6.929209	45.83461	4477.15	2635.22	58.85931899	1 551.07
	29	1.218809	2.406863	1.188055	97.47671	406.66	356.88	87.75881572	313.19
Le Cannet-des-Maures	30	2.781167	3.39	0.6088	21.86	868.43	261.84	30.15096208	78.95
	31	8.652369	10.62934	1.9769	22.8489	2376.78	825.14	34.71671758	286.46
	32	11.05	13.91	2.85	25.83	3036.5	1197.99	39.45298864	472.64
	34	1.47	1.99	0.51	37.73	438.82	175.25	39.93664828	69.99
La Croix-Valmer	35	1.45	1.79	0.34	23.73	354.26	171.78	48.48980974	83.30
Artigues	36	1.16	1.48	0.3158	27.173	464.980343	94.65	20.35569921	19.27
	37	17.28	17.91	0.63	3.65	5370.786772	202.23	3.765370114	7.61
	38	3.32	4.44	1.13	33.91	1125.757662	443.04	39.35482875	174.36
	39	7.56	8.23	0.67	8.87	2676.21509	255.89	9.561638037	24.47
	40	5.9	6.05	0.14	2.45	2018.46556	56.7	2.809064525	1.59
La Londe-les-Maures	41	2.691127	3.079766	0.388639	14.44151	610.96	201.42	32.9677884	66.40
	42	1.244576	1.564143	0.319566	25.67673	316.08	158.85	50.25626424	79.83
	43	1.300625	1.70854	0.4079146	31.36297	285.76	143.99	50.38843785	72.55
	44	6.113235	6.5427	0.429466	7.02519	1363.37	191.74	14.06368044	26.97
	45	4.3812	4.7221	0.3608	8.237297	1033.95	155.03	14.99395522	23.25

Annexe 2:Détail des relevés 1km en aval de l'entrée de la Zone vulnérable

Zone d'étude	ID	Q avant incendie	Q après incendie	Différence (m^3/s)	Différence (%)	Surface du bassin versant (ha)	Surface brulée (ha)	Surface brulée (%)	Surface brulée (ha) * Surface brulée (%) / 100
Vidauban	1	3.47	5.13	1.65	47.52	877.22	827.71	94.36	102.89
	2	5.30	10.65	5.34	100.75	1 983.89	1 634.28	82.38	99.85
	3	4.27	5.87	1.59	37.33	1 045.61	841.95	80.52	84.94
	4	1.63	2.42	0.80	49.09	455.02	363.83	79.96	10.72
	5	6.89	9.58	2.70	39.15	1 728.53	1 360.02	78.68	72.49
	6	12.76	19.69	6.93	54.31	3 874.47	2 635.22	68.01	780.99
	7	0.69	1.47	0.78	112.86	251.16	233.91	93.13	1 346.28
Le Cannet-des-Maures	8	2.41	2.88	0.40	16.70	752.21	183.85	24.44	677.96
	9	8.17	9.78	1.59	19.42	2 217.87	694.12	31.30	290.92
	10	1.78	2.53	0.74	41.80	479.17	329.42	68.75	1 070.07
	11	1.02	1.42	0.40	39.42	318.74	135.34	42.46	1 792.34
La Croix-Valmer	12	1.02	1.20	0.19	18.52	245.62	99.08	40.34	217.84
Artigues	13	1.04	1.35	0.32	30.43	426.81	94.65	22.18	44.94
	14	1.00	1.17	0.17	17.35	218.10	50.88	23.33	217.24
	15	2.66	3.79	1.13	42.26	977.11	443.03	45.34	226.47
	16	6.62	7.59	0.67	9.69	2 482.27	255.89	10.31	57.47
	17	3.08	3.22	0.14	4.68	1 055.82	56.55	5.36	39.97
La Londe-les-Maures	18	1.64	1.91	0.26	16.01	346.58	188.84	54.49	20.99
	19	0.88	1.18	0.30	34.47	225.72	150.13	66.51	11.87
	20	1.05	1.46	0.41	38.71	244.08	143.99	58.99	200.87
	21	0.53	0.60	0.07	12.91	125.68	36.71	29.21	26.38
	22	0.29	1.01	0.71	40.43	189.70	117.27	61.82	3.03

Annexe 1: Détail des relevés à l'entrée de la zone vulnérable