

Document public

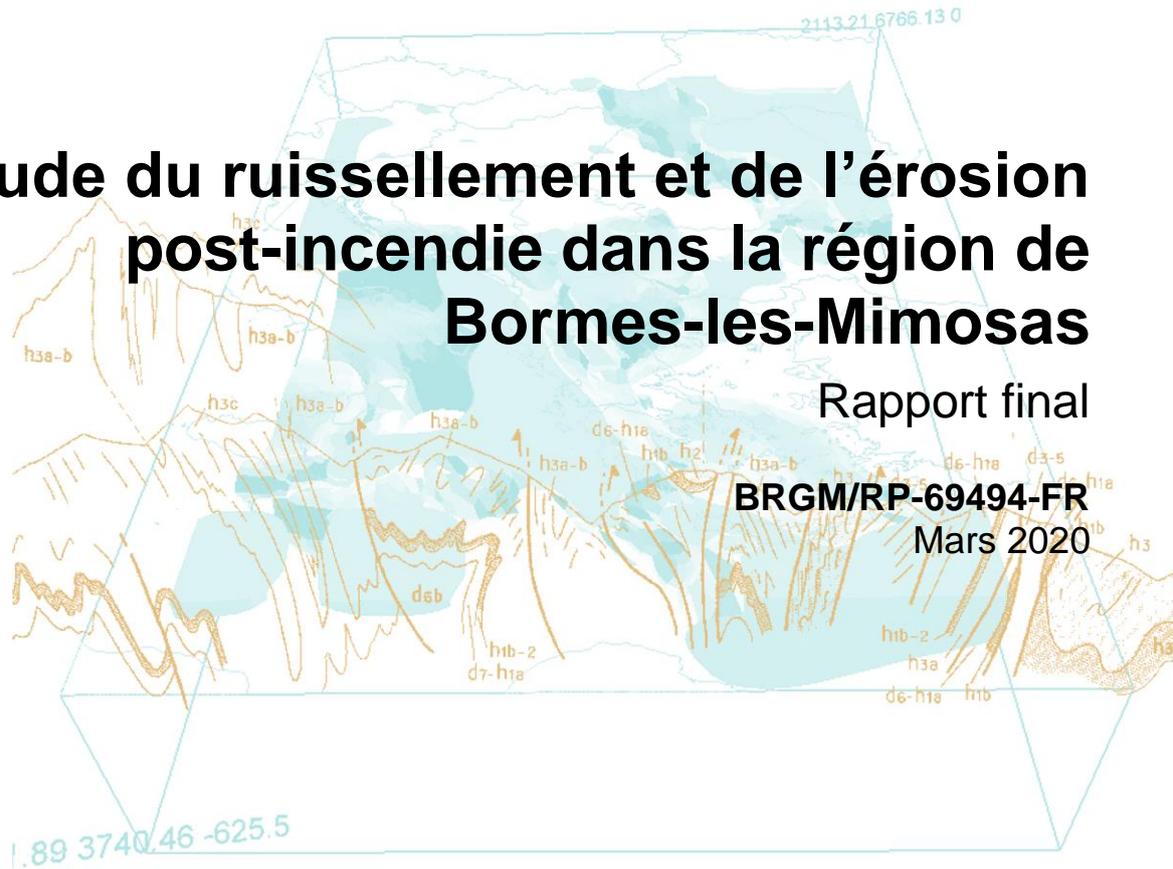


Étude du ruissellement et de l'érosion post-incendie dans la région de Bormes-les-Mimosas

Rapport final

BRGM/RP-69494-FR

Mars 2020



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Étude du ruissellement et de l'érosion post-incendie dans la région de Bormes-les-Mimosas

Rapport final

BRGM/RP-69494-FR
Mars 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2020

T. Grangeon
Avec la collaboration de
R. Vandromme et N. Marcot

Vérificateur :

Nom : Olivier Cerdan

Fonction : Ingénieur

Date : 08/04/2020

Signature :



Approbateur :

Nom : Olivier Bouc

Fonction : Directeur adjoint

Date : 20/04/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Incendie, Ruissellement, Érosion, Aménagement, Gestion du risque, Bormes-les-Mimosas, Massif des Maures, Var, Provence-Alpes-Côte d'Azur

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Grangeon T. et al. (2020) – Étude du ruissellement et de l'érosion post-incendie dans la région de Bormes-les-Mimosas. Rapport final. BRGM/RP-69494-FR, 101 p., 59 ill., 2 ann.

Synthèse

La commune de Bormes-les-Mimosas a subi pendant l'été 2017 un incendie ayant fortement affecté son territoire. Cette étude vise à analyser, pour quatre sous-bassins versants du territoire, les conséquences de cet incendie en terme d'aléa érosion et ruissellement et à proposer des pistes de réduction du risque en certains points du territoire. Elle se décompose en plusieurs phases :

- une étude de terrain, réalisée en 2019, visant à caractériser à posteriori, les caractéristiques du bassin versant mais également de l'incendie ainsi que ses conséquences. Ce travail se base sur un travail de collecte de données, notamment auprès des acteurs locaux, d'observations et de cartographie de terrain ;
- ces relevés de terrain ont ensuite été couplés à une analyse bibliographique afin de les retranscrire en données d'entrée pour un modèle de ruissellement et d'érosion ;
- la phase de terrain a également servi à établir un inventaire des ouvrages hydrauliques présents sur le territoire. Suite à plusieurs concertations avec les acteurs locaux, notamment les services techniques de la ville de Bormes-les-Mimosas, et à leur retour d'expérience, une sélection des ouvrages les plus sensibles au risque ruissellement et érosion est effectuée ;
- le modèle de ruissellement et d'érosion est utilisé afin d'analyser le sur-aléa ruissellement et érosion induit par les feux de forêts, et l'aléa résiduel encore présent dans la configuration actuelle du territoire (2019) ;
- finalement, des propositions d'aménagements sont formulées afin de limiter le risque résiduel au droit des ouvrages identifiés.

La caractérisation du territoire est une partie importante de ce travail. Les bassins versants, impactés sur plus de 65 % de leur surface, se caractérisent aujourd'hui par une alternance de zones présentant une reprise de la végétation quasi-nulle et des zones de meilleure reprise (respectivement 15 % et 85 % de la zone incendiée). La variabilité des zones incendiées montre l'importance d'une prise en compte de l'hétérogénéité spatiale et temporelle de ce territoire, et donc l'inadéquation de méthodes d'évaluation globales.

Une variabilité importante de l'épaisseur des sols est remarquée. La roche mère affleure en certains points du fait d'une épaisseur initialement faible et d'une érosion intense, notamment dans les zones les plus amonts et sur des voies d'écoulements préférentiels tels les chemins et les pistes. En revanche, des épaisseurs importantes sont ponctuellement observées en amont, mais aussi et principalement dans les parties les plus aval. Du fait de son importance tant en terme de capacité d'infiltration de l'eau de ruissellement que de matériaux disponible pour l'érosion, cette observation est retranscrite et spatialisée dans le modèle.

Deux ans après l'incendie, la végétation a globalement entamé une reprise significative, diminuant le sur-aléa ruissellement et érosion. Cependant, faute d'une reprise généralisée, le risque résiduel est aujourd'hui encore élevé par rapport à la situation pré-incendie et ce, quel que soit le scénario de pluie considéré. En revanche, pour les scénarios définis en concertation avec les acteurs de ce projet, les effets de l'état initial du sol sont considérés comme peu influents sur l'aléa ruissellement et érosion.

Finalement, la sensibilité des ouvrages particulièrement sensibles est étudiée plus finement, et des propositions afin de diminuer le sur-aléa sont formulées.

Sommaire

1. Introduction	13
1.1. CONTEXTE	13
1.2. OBJECTIFS	14
2. Démarche de travail adoptée et présentation de l’outil de modélisation	15
2.1. PHILOSOPHIE GÉNÉRALE DE LA MODÉLISATION.....	15
2.2. PRINCIPE DU MODULE HYDROLOGIQUE	15
2.3. PRINCIPE DU MODULE EROSION	15
2.4. MISE EN APPLICATION.....	16
3. Collecte et analyse des données.....	19
3.1. CARACTÉRISTIQUES TOPOGRAPHIQUES DE LA ZONE D’ÉTUDE.....	19
3.2. LITHOLOGIE	21
3.3. EPAISSEUR DES SOLS.....	26
3.4. OCCUPATION DES SOLS	29
3.5. EMPRISE DE L’INCENDIE, ÉVOLUTION TEMPORELLE ET REPRISE DE LA VÉGÉTATION.....	31
3.6. IMPLICATION POUR LA CLASSIFICATION DES ZONES INCENDIÉES.....	34
3.7. CHOIX DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES POUR LES SIMULATIONS	38
3.7.1. Evènements décennal et cinquantennal.....	38
3.7.2. Evènement extrême.....	39
3.7.3. Caractéristiques des évènements modélisés	40
3.8. INVENTAIRE DE TERRAIN ET AMÉLIORATION DE LA DONNÉE TOPOGRAPHIQUE	41
4. Modélisation du ruissellement et de l’érosion	43
4.1. PRÉALABLE : LIMITATIONS DE LA MODÉLISATION	43
4.2. MÉTHODOLOGIE CHOISIE ET ADAPTATION	44
4.3. PARAMÉTRISATION DU MODÈLE.....	45
4.4. RAPPEL ET SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS DE MODÉLISATION.....	46
4.5. RÉSULTATS DE MODÉLISATION ET INTERPRÉTATION.....	46
4.5.1. Pluie décennale avant incendie sur un terrain sec	46

4.5.2. Pluie décennale après incendie sur terrain sec	48
4.5.3. Effet de la période de retour de la pluie.....	51
4.5.4. Quantification des résultats à l'échelle globale	53
4.6. POINTS SENSIBLES ET EFFETS GLOBAUX DES INCENDIES	61
4.7. PRÉSENTATION DES POINTS SENSIBLES, EFFETS DES INCENDIES ET PROPOSITIONS D'AMÉNAGEMENTS	64
4.7.1. Avant-propos	64
4.7.2. Fiche 1 : Entrée de la piste de Cardenon	65
4.7.3. Fiche 2 : Entrée de propriété.....	67
4.7.4. Fiche 3 : Piste de Cardenon.....	69
4.7.5. Fiche 4 : Entrée de résidence	71
4.7.6. Fiche 5 : Carrefour route des plages et route de Cabasson	73
4.7.7. Fiche 6 : Passerelle du Chemin du petit fort.....	75
4.7.8. Fiche 7 : Entrée du Domaine du Luxembourg	77
4.7.9. Fiche 8 : Gué du chemin du Bout du Monde	79
4.7.10. Fiche 9 : Route communale Malherbe en amont du Camping GCU	80
4.8. QUANTIFICATION DES EFFETS DES AMÉNAGEMENTS PROPOSÉS.....	82
5. Conclusions.....	85
6. Bibliographie	87

Table des illustrations

Illustration 1 :	Carte de l'emprise des zones incendiées durant l'été 2017 et des crues de 2014 (source : CCMPM / SCP).....	13
Illustration 2 :	Carte des sous-bassins de Bormes fragilisés par l'incendie de 2017 (source : CCMPM / SCP).....	14
Illustration 3 :	Résumé des étapes de la démarche de modélisation.....	17
Illustration 4 :	Localisation des bassins versants définis dans le cadre du PAPI côtier des Maures (en noir) ainsi que des quatre sous-bassins versants de l'étude (en bleu) sur fond de carte Scan 100 IGN.	19
Illustration 5 :	a) Topographie et b) carte des pentes des bassins versants de l'étude sur fond de carte Scan 25 IGN.	20
Illustration 6 :	Principales caractéristiques morphologiques des sous-bassins versants. Les variables « Pente _{10%} » et « Pente _{90%} » désignent les premiers et neuvièmes déciles de la distribution des pentes.	21
Illustration 7 :	Contexte géographique du Massif des Maures (Var – France).....	21
Illustration 8 :	Carte lithologique simplifiée du Massif des Maures (source : lithologie 1/1 000 000 BRGM)	23
Illustration 9 :	Profil idéal d'altération développé sur un substratum rocheux (adapté du Geological Society Engineering Group Working Party (1990) and Migoń (2010)).....	24
Illustration 10 :	Cartes géologiques de la région d'étude (Carte BRGM au 1/50000 ^e).....	25
Illustration 11 :	Illustration d'épaisseurs de sols rencontrées sur le terrain a) plutôt épaisse, localisé dans une zone de bas-fond (ici au sud de la route de Cabasson) et b) plutôt faible, localisée sur des zones amonts du bassin versant (ici sur la redescente vers le chemin de Cardenon depuis les crêtes). c) et d) sont des photos prises sur des chemins, respectivement c) avec une épaisseur nulle à faible dans le vallon du Gaspardet et d) importante sur le chemin situé entre la route de Cabasson et la piste de Vincennes. Le mètre est déployé en d) sur une épaisseur de deux mètres.	27
Illustration 12 :	Épaisseur de sol calculée sur la zone d'étude, sur fond de carte Scan 25 IGN.....	28
Illustration 13 :	Superficie et occupation du sol des différents sous-bassins versants de la zone du PAPI côtier des Maures (en pourcentage). A noter : certains 0 correspondent à des proportions très faibles au regard de la taille du territoire et pas à l'absence de détection (e.g. les routes)	30
Illustration 14 :	Superficie et occupation du sol des différents sous-bassins versants de la zone d'étude, en pourcentage.	30
Illustration 15 :	Occupation des sols retenue dans le cadre de cette étude sur fond de Scan25 IGN.	31
Illustration 16 :	Détermination de la zone incendiée telle que déterminée par l'ONF pour l'année 2017 (en fond grisé et par Corine Land Cover pour l'année 2018 (en contour rouge) sur fond de carte Scan 25 IGN	32
Illustration 17 :	Variations de la reprise de la végétation sur le site. La distance entre les deux prises de vue est d'environ 200 mètres, et toutes deux se situent dans la zone détectée comme incendiée.	33
Illustration 18 :	Emprise des zones de moindre reprise de la végétation sur le terrain d'étude (en grisé) sur fond de cart Scan 25 IGN.	34
Illustration 19 :	Proposition d'adaptation des zones incendiées, ici pour l'année 2017, incluant observations de terrain, retour d'expérience et données obtenues a priori auprès de l'ONF et par Corine Land Cover, sur fond de carte Scan 25 IGN.	35
Illustration 20 :	Évolution des zones brûlées par bassin versant et par année.	36

Illustration 21 : Exemple de zone sur laquelle la végétation 1) est toujours peu réinstallée 2) s'est rétablie et 3) de fascines installées sur terrain incendié	37
Illustration 22 : Évènement de référence survenu au Cap Cépet servant de référence en terme de hyétographe à cette étude	38
Illustration 23 : Évènements retenus dans le cadre de cette étude : a) pluie décennale et b) pluie cinquantennale.....	39
Illustration 24 : Carte radar de l'évènement pluvieux sélectionné (source : Météo France, portail « Pluies extrêmes ») et hyétogramme correspondant.....	39
Illustration 25 : Résumé des caractéristiques des évènements pluvieux modélisés	40
Illustration 26 : Localisation des ouvrages relevés sur le terrain, présents sur la zone d'étude, sur fond de carte Scan 25 IGN.	41
Illustration 27 : Illustration de l'inclusion des levés de terrain sur l'écoulement simulé. La zone est centrée sur la D42A au niveau de la redescende vers le Sud-Ouest depuis le col Griotte, sur une zone représentative des difficultés du terrain d'étude. A) Montre un écoulement sur le MNT initial (plus les lignes bleues sont foncées, plus le volume écoulé est important) et B) celui sur le MNT modifié suite aux relevés de terrain. Les points rouges signalent la présence d'ouvrages hydrauliques.	42
Illustration 28 : Illustration pour a) l'évènement décennal de b) la réponse pluie-ruissellement de différentes conditions de sols selon la méthodologie choisie	44
Illustration 29 : Résumé des scénarios de modélisations	46
Illustration 30 : Cartographie a) des coefficients de ruissellement et b) des taux d'érosion locaux, ici pour la configuration 2017 avant incendie et pour l'évènement décennal sur terrain sec, sur fond de carte Scan 25 IGN	47
Illustration 31 : Synthèse des volumes liquides et solides exportés à l'exutoire des bassins versants	48
Illustration 32 : Synthèse des données simulées sur le bassin versant, pour les données classées sous la nomenclature forêt	49
Illustration 33 : Cartographie a) des coefficients de ruissellement et b) des taux d'érosion locaux, ici pour la configuration 2017 après incendie et pour l'évènement décennal sur terrain sec sur fond de carte Scan 25 IGN.	50
Illustration 34 : Ruissellement simulé sur configuration de sol brûlé en 2017, ici zoomé sur le bassin versant de Brégançon, pour les évènements a) décennal b) cinquantennal et c) extrême. L'échelle de couleur est identique sur les trois figures. Résultat présenté sur MNT ombragé et fond de carte IGN Scan 25.	52
Illustration 35 : Représentation a) du volume d'eau b) du débit de pointe et c) de la masse de matériaux transférés pour tous les scénarios (sauf extrêmes) et toutes les localisations. La ligne noire sur chacun de ces graphiques représente la première bissectrice.	54
Illustration 36 : a) Volume ruisselé b) débit de pointe et c) masse de sédiments transportés pour les quatre sous-bassins versants de l'étude. Résultat ici présenté pour l'année 2017 avant (figuré clair) et après (figuré foncé) incendie, pour la période de retour 10 ans. Le pourcentage d'augmentation attribuable à l'incendie est indiqué sous la forme de pourcentage au-dessus des barres.	56
Illustration 37 : a) Volume ruisselé b) débit de pointe et c) masse de sédiments transportés pour les quatre sous-bassins versants de l'étude. Résultat ici présenté pour l'année 2017 avant (figuré clair) et après (figuré foncé) incendie, pour la période de retour 50 ans. Le pourcentage d'augmentation attribuable à l'incendie est indiqué sous la forme de pourcentage au-dessus des barres.	58

Illustration 38 : a) Volume ruisselé b) débit de pointe et c) masse de sédiments transportés pour les quatre sous-bassins versants de l'étude. Résultat ici présenté avant (figuré foncé) et après incendie (figuré clair), mais également sur une situation actuelle (2019, couleur moyenne), pour la période de retour 10 ans. Le pourcentage de réduction attribuable à la reprise de la végétation suite à l'incendie est indiqué sous la forme de pourcentage au-dessus des barres.	60
Illustration 39 : Localisation des ouvrages relevés sur le terrain (en rouge) et de ceux identifiés comme les plus importants par les services techniques de la ville de Bormes-lès-Mimosas (en bleu, accompagné de leur identifiant numérique). Données présentées sur fond de carte Scan 25 IGN.	62
Illustration 40 : Impact de l'incendie sur a) les volumes ruisselés b) le débit de pointe et c) les masses de terre transportées, pour l'évènement décennal. L'emprise et la sévérité de la zone incendiée est également présentée sur fond de carte Scan25 IGN.	63
Illustration 41: Illustration de l'entrée de la piste de Cardenon ; le mètre positionné en bordure de fossé, sur la gauche de l'image, est déplié sur une longueur de deux mètres	66
Illustration 42 : Mouvement de terrain observé en bordure.....	66
Illustration 43 : Amont de l'ouvrage	67
Illustration 44 : a) ouvrage en entrée de propriété et b) photo prise en aval	68
Illustration 45 : Vu de l'ouvrage (pont busé – 800 mm) (photo prise le 11 décembre 2019)	69
Illustration 46 : Arrachement en aval. (photo prise le 11 décembre 2019)	70
Illustration 47 : Vue depuis l'amont	71
Illustration 48 : Vue de l'entrée de la résidence	72
Illustration 49 : Vue de l'ouvrage	73
Illustration 50 : Vue de la vigne à l'amont de l'ouvrage	74
Illustration 51 : Vue de l'ouvrage hydraulique en amont de la passerelle (photo prise le 11/12/2019)	75
Illustration 52 : Vue de la passerelle. (photo prise le 11/12/2019)	76
Illustration 53 : Illustration du ravinement du fossé. Le mètre positionné en bordure de fossé, sur la droite de l'image, est déplié sur une longueur de deux mètres.....	78
Illustration 54 : Atterrissement de matériaux au niveau de l'ouvrage hydraulique. Photo fournie par les Services techniques de Bormes-lès-Mimosas.	79
Illustration 55 : Arrivée de l'écoulement en amont de l'ouvrage (Photo fournie par les Services techniques de Bormes-lès-Mimosas)	80
Illustration 56 : a) ouvrage en amont du camping b) thalweg en amont de l'ouvrage. (photos prises le 11/12/2019).....	81
Illustration 57 : Localisation des ouvrages et localisation des aménagements proposés.....	82
Illustration 58 : Correspondance entre numéro de fiche et identifiants présentés ci-dessous.....	82
Illustration 59 : Effet des aménagements proposés sur a) le ruissellement, b) le débit de pointe et c) les masses transportées, au droit des aménagements	83

Liste des Annexes

Annexe 1 Analyse des données pluviométriques	89
Annexe 2 Illustrations de solutions de remédiation contre le ruissellement et l'érosion des sols (d'après Landemaine <i>et al.</i> 2019).....	95

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

La gestion des risques naturels géologiques et la protection des personnes et des biens constituent un enjeu permanent à tous les échelons de la société civile. L'évaluation du risque en termes d'impact humain, matériel ou économique passe impérativement par une qualification à minima – et au mieux une quantification des aléas. Cette quantification de l'aléa nécessite une amélioration des méthodes d'évaluation de la probabilité d'occurrence, spatiale et temporelle, des phénomènes.

Si des progrès ont été réalisés sur la compréhension des mécanismes de l'érosion et du ruissellement et sur leur modélisation, la compréhension et la représentation de certains processus reste problématique. Les incendies sont typiques de ces questionnements, car ils provoquent un sur-aléa qu'il est nécessaire de caractériser et d'intégrer au sein des modélisations.

Lors de l'été 2017, le territoire du PAPI Côtier des Maures a été affecté par des incendies de forêt survenus en deux événements et touchant près de 1 800 ha (Illustration 1).

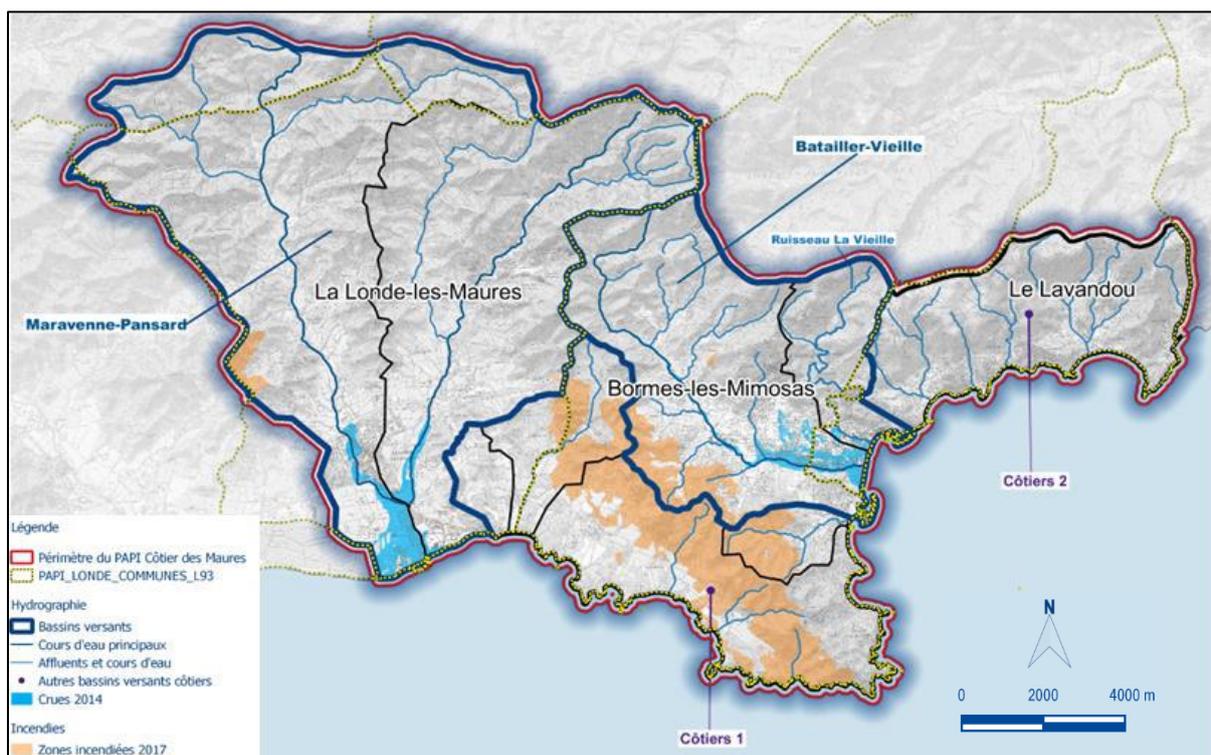


Illustration 1 : Carte de l'emprise des zones incendiées durant l'été 2017 et des crues de 2014 (source : CCMPM / SCP).

1.2. OBJECTIFS

Ce projet propose de réaliser une étude définissant les incidences sur le ruissellement et l'érosion des incendies ayant touché une partie du territoire du PAPI durant l'été 2017 (Illustration 2).

L'étude se focalisera sur les secteurs très sensibles par ces phénomènes sur la commune de Bormes-les-Mimosas ; elle concernera les sous-bassins de la Favière et du Gaspardet, du Patelin, du Cabasson et, dans une moindre mesure, de Brégançon.

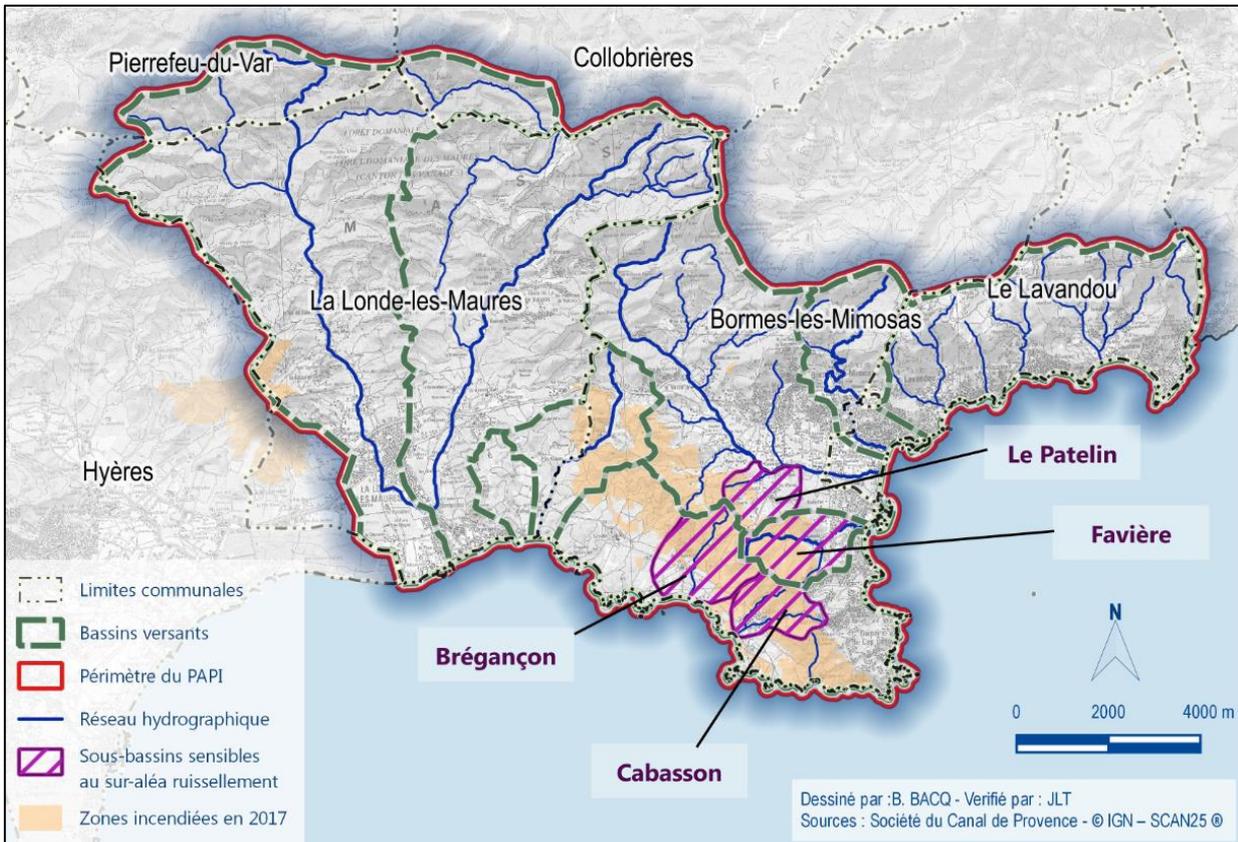


Illustration 2 : Carte des sous-bassins de Bormes fragilisés par l'incendie de 2017 (source : CCMPM / SCP).

Il s'agira là d'étudier les conséquences des incendies de forêt en termes d'accroissement du ruissellement. Le travail se concentrera sur l'étude du ruissellement et de l'érosion des sols. Une attention particulière sera portée sur l'évaluation du sur-aléa induit par l'incendie ayant frappé le territoire.

Du fait de la difficulté inhérente à l'instrumentation de manière pérenne et pertinente d'une zone d'étude avant et après occurrence d'un incendie, cette étude se basera sur de la collecte de données (auprès des acteurs locaux, étude de terrain, données satellitaires, bibliographie...) visant à une étude par modélisation. Cette étude ayant démarré un an après l'incendie, il s'agira de reconstituer des situations plausibles aux échéances suivantes : avant incendie, juste après incendie et aujourd'hui. Le modèle sera appliqué à ces trois situations afin d'évaluer le sur-aléa ruissellement et érosion.

2. Démarche de travail adoptée et présentation de l'outil de modélisation

Pour une description détaillée du fonctionnement du modèle, le lecteur est renvoyé à la publication de Landemaine (2016). Les grands principes de celui-ci sont néanmoins rappelés ci-dessous.

2.1. PHILOSOPHIE GÉNÉRALE DE LA MODÉLISATION

L'objectif est de modéliser les volumes ruisselés et les quantités de matériaux exportés pendant un événement pluvieux, avant et après un incendie, afin d'évaluer le sur-aléa lié aux incendies. Le modèle utilisé est le modèle WaterSed. Il s'agit d'un modèle événementiel intégré : la dynamique temporelle n'est pas explicitement résolue, mais elle est approchée. Ainsi, si les résultats sont intégrés à l'échelle de l'évènement, les variables clés de l'hydrogramme (telles que le débit de pointe et le temps de montée au pic de ruissellement) sont néanmoins simulées. Le modèle est distribué spatialement : un bilan hydrosédimentaire est effectué sur chaque maille de la zone d'étude et propagé de l'amont vers l'aval.

2.2. PRINCIPE DU MODULE HYDROLOGIQUE

L'hydrologie est résolue selon une méthode de type bilan : si l'intensité de la pluie (qui peut être distribuée, bien qu'elle ne le soit pas dans le cadre de ce projet du fait du manque de données et de la taille de la zone d'étude) est supérieure à la capacité d'infiltration du sol, alors du ruissellement va se former : on parle de ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration. Il se produit typiquement lorsqu'un orage très intense impacte un sol très peu perméable. La capacité d'infiltration dépend de l'occupation du sol, de sa texture et de son état superficiel.

Par ailleurs, l'eau infiltrée dans le sol va alimenter un réservoir de sub-surface. L'infiltration est possible tant que ce réservoir, n'est pas rempli. Si la quantité d'eau infiltrée dans le sol à la fois par imbibition au cours des premiers instants de la pluie, mais également au cours de la propagation du ruissellement au sein du bassin versant, dépasse la réserve du sol alors les pixels correspondants n'ont plus la capacité d'absorber l'eau. L'infiltration est alors refusée, formant également du ruissellement, désigné par le terme de ruissellement par saturation du sol.

2.3. PRINCIPE DU MODULE EROSION

L'érosion est modélisée selon les deux processus usuellement décrits dans la littérature : l'érosion diffuse et l'érosion concentrée. La première correspond à la genèse de particules fines en surface sous l'effet de l'impact des gouttes de pluie. Ces impacts vont désagréger et mettre en mouvement des agrégats depuis la matrice du sol, et les transporter sur une distance limitée. Ce processus génère en revanche des quantités importantes de matériaux disponibles pour un transport subséquent par le ruissellement. Par ailleurs, si la lame d'eau ruisselante dépasse un certain débit, la contrainte cisailante appliquée sur le sol va arracher des particules et les transporter. Ce type d'écoulement a donc tendance à creuser un chenal qui va canaliser les écoulements, et ainsi s'auto-entretenir, aboutissant à la formation de ravines, qui sont modélisées pendant les simulations. Enfin, lors du transport, si les matériaux érodés

sont progressivement accumulés depuis l'amont vers l'aval par le ruissellement, le modèle simule également leur dépôt, sous l'effet de deux processus distincts également. Le dépôt se fait tout d'abord au fur et à mesure de l'infiltration du ruissellement dans le sol, ce qui provoque une diminution de la capacité de transport et donc un dépôt. Il s'effectue par ailleurs sous l'effet de la chute des particules de sols sous l'effet de la diminution de la vitesse d'écoulement, notamment lorsque le rapport entre rugosité de surface et épaisseur de la lame d'eau augmente.

2.4. MISE EN APPLICATION

Afin d'analyser l'effet des incendies sur le ruissellement et l'érosion, il est dans un premier temps nécessaire de définir l'aléa pluviométrique auquel le territoire sera confronté. En effet, la pluviométrie conditionne le ruissellement, lequel conditionne en grande partie l'érosion. Cette définition est donc primordiale pour la suite de l'étude.

L'autre facteur conditionnant la réponse ruisselante et érosive d'un système est le sol. Il est couramment défini selon deux critères : le type de sol (composante interne) et son occupation (composante externe de surface). L'objectif étant ici d'analyser l'effet des incendies, il sera donc nécessaire d'effectuer une série de modélisation à l'état initial, autrement dit non-perturbé par les incendies. Puis les mêmes simulations seront effectuées sur les bassins versants une fois l'occupation des sols adaptée suite à l'incendie. Ceci permettra d'analyser les différences relatives du ruissellement et de l'érosion dues aux incendies.

Par ailleurs, le modèle numérique de terrain ne reflète en général qu'une réalité imparfaite du terrain, à minima du fait des résolutions couramment disponibles ; les modèles disponibles ont généralement une résolution de 5 à 25 m. Ces résolutions sont inadaptées à la représentation des nombreux facteurs influençant le ruissellement dans la réalité (e.g. fossés en bord de route). Le modèle numérique de terrain utilisé devra donc être adapté suite aux observations de terrain.

Pour ce faire, la mise en place de la démarche de modélisation nécessitera de récolter les informations suivantes (Illustration 3) :

- une / des pluie(s) de projet : dans le cadre de cette étude, bien que des données pluviométriques soient disponibles et aient été traitées dans un premier temps, il a finalement été choisi de se raccorder à une pluie définie selon deux pluies périodes de retour : 10 ans et 50 ans. Un évènement extrême est également simulé afin de fournir une étude qualitative ;
- types de sols : les sols seront ici définis par leur géologie et leur potentiel d'altération ;
- occupation des sols : il sera nécessaire de reconstruire une occupation des sols avant incendie, puis de l'adapter suite aux observations de terrain et retours d'expérience acquises après incendie ;
- modèle numérique de terrain : les données acquises auprès de l'IGN devront être adaptés par relevés sur le terrain.

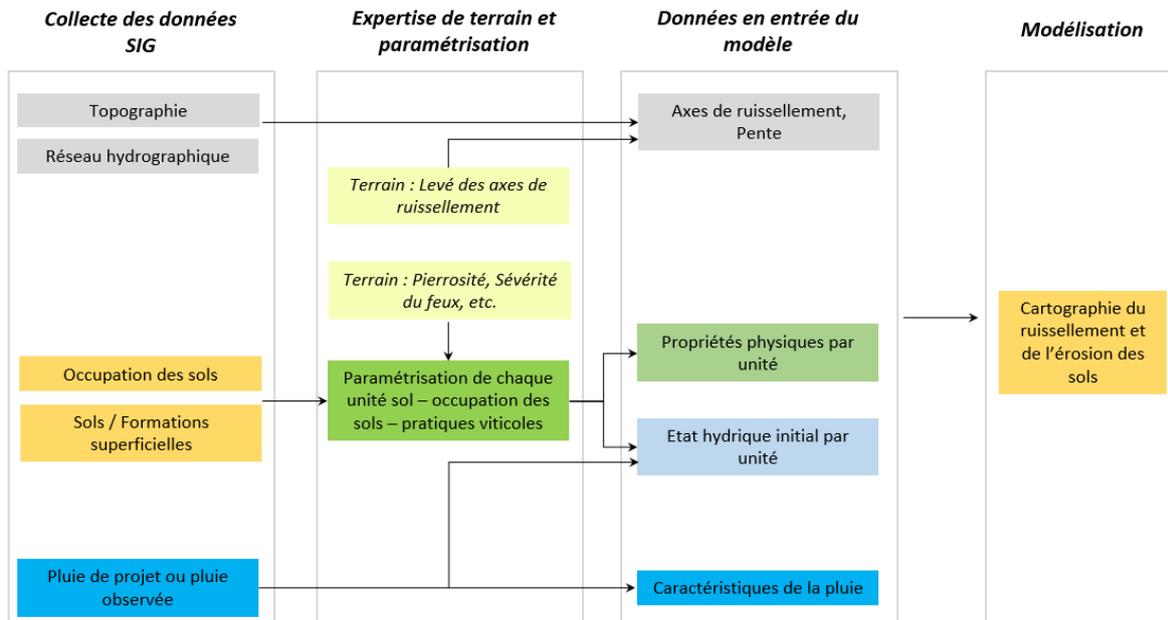


Illustration 3 : Résumé des étapes de la démarche de modélisation.

3. Collecte et analyse des données

3.1. CARACTÉRISTIQUES TOPOGRAPHIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE

Les sous-bassins versants de l'étude sont localisés dans la partie Sud de la zone d'étude du PAPI (Illustration 4).

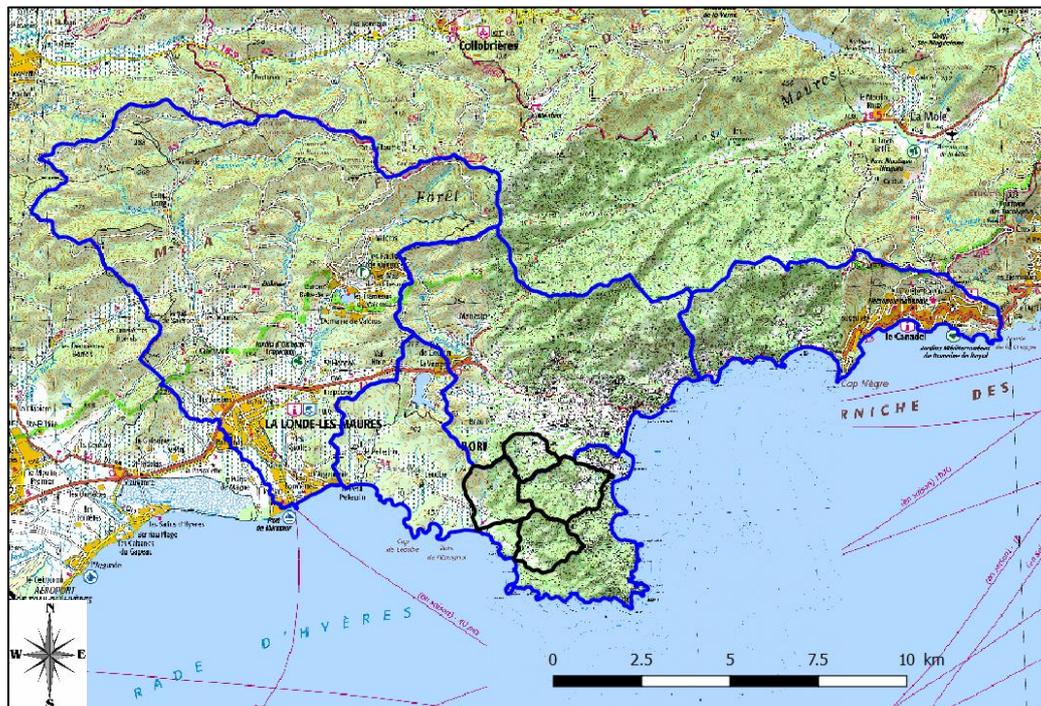


Illustration 4 : Localisation des bassins versants définis dans le cadre du PAPI côtier des Maures (en bleu) ainsi que des quatre sous-bassins versants de l'étude (en noir) sur fond de carte Scan 100 IGN.

Il s'agit de quatre bassins versants principalement situés en zone côtière, trois d'entre eux ayant leur exutoire immédiatement à la mer. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) utilisé est issu du RGE ALTI (au sein du Référentiel à Grande Échelle de l'IGN, il s'agit de la composante ALTI métrique). Il fournit un MNT de résolution de cinq mètres, ainsi qu'une précision affinée à un mètre le long de la zone littorale. Ainsi, les sous-bassins versants de Léoube, Favière et Brégançon bénéficient d'une excellente résolution, tandis que celle de Patelin est moins détaillée (Illustration 5 a) et b)). À noter que la définition précise de ces bassins versants au cours de cette étude a amené à redéfinir leur dénomination afin d'éviter des confusions.

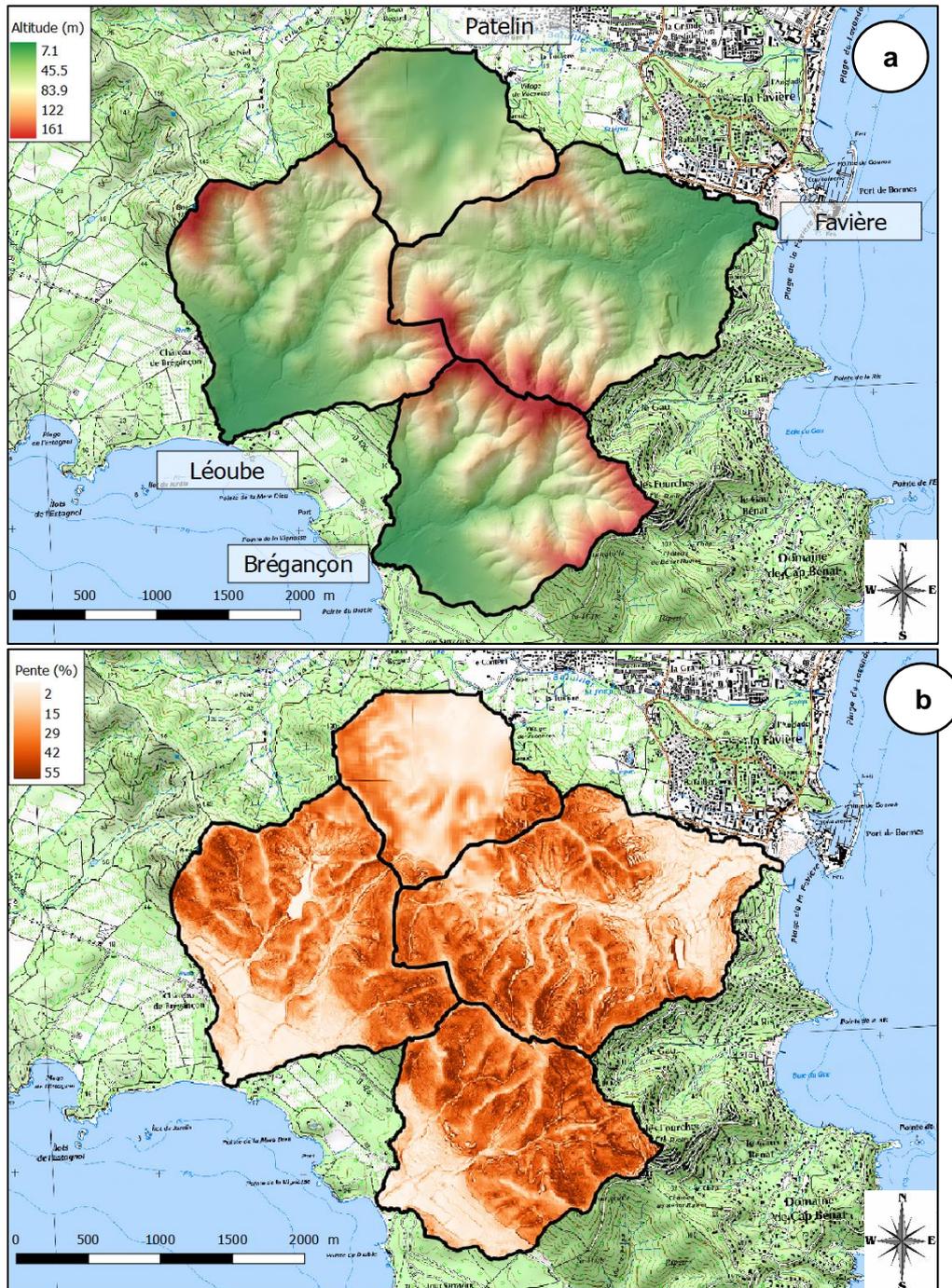


Illustration 5 : a) Topographie et b) carte des pentes des bassins versants de l'étude sur fond de carte Scan 25 IGN.

Sur la base de ce MNT, les principales caractéristiques topographiques des différents bassins versants de l'étude ont été calculées (Illustration 6).

	Léoube	Patelin	Favière	Brégançon
Surface (km² - % de la surface totale)	1.38-15 %	3.03-33 %	2.56-28 %	2.18-24 %
Altitude min. (m)	1	10	1	1
Altitude max. (m)	143	113	147	176
Altitude médiane (m)	58	52	59	76
Pente_{10%} (%)	4	4	5	6
Pente médiane (%)	27	15	26	31
Pente_{90%} (%)	43	35	44	48
Longueur du drain principal (km)	2.6	1.6	3.5	2.2
Pente médiane du drain principal (%)	11	10	15	21
Pente_{90%} du drain principal (%)	30	24	36	48

Illustration 6 : Principales caractéristiques morphologiques des sous-bassins versants. Les variables « Pente_{10%} » et « Pente_{90%} » désignent les premiers et neuvièmes déciles de la distribution des pentes.

Ce modèle numérique de terrain est complété par la base de données CARTHAGE, qui fournit une cartographie du réseau hydrographique, ainsi que par la base de données TOPO, apportant notamment des informations sur le parcellaire, ainsi que sur les infrastructures routières.

3.2. LITHOLOGIE

La géologie du secteur étudié correspond au contexte métamorphique occidental du Massif des Maures (Illustration 7).

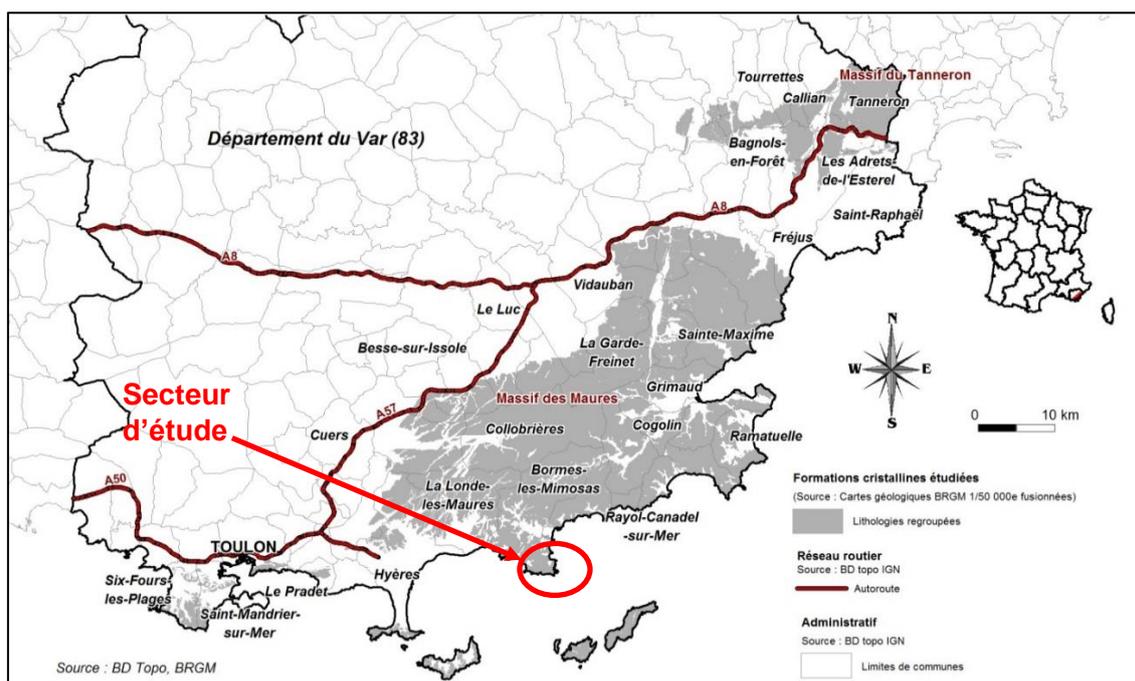


Illustration 7 : Contexte géographique du Massif des Maures (Var – France).

Les Maures représentent un petit massif montagneux de 1 180 km² situé au sud-est de la France en bordure de la Méditerranée. Il est allongé selon une direction nord-est/sud-ouest entre les villes de Fréjus – Saint-Raphaël et de Toulon. Le massif des Maures, avec le massif du Tanneron, le massif rhyolitique de l'Estérel, les îles de Port Cros, Porquerolles et du Levant, constituent un des fragments de la branche méridionale de la zone interne de la chaîne varisque ouest-européenne, et appartiennent à la basse-Provence cristalline (Arthaud et Matte, 1974 ; Autran et Cogné, 1980 ; Matte, 1986).

Le massif des Maures est constitué de plusieurs ensembles de roches métamorphiques et magmatiques d'ouest en est (Illustration 8) :

- l'unité occidentale constituée de schistes à Graptolites (Fenouillet), de quartzites, de phyllades, d'orthogneiss (Bormes), de micaschistes, d'amphibolites et de leptynites (Collobrières). Cette unité est limitée à l'est par la faille de Cavalaire ;
- l'unité centrale, constituée de gneiss, micaschistes, migmatites, leptynites et amphibolites ; Elle est limitée par la faille de Grimaud à l'est ;
- l'unité orientale composée de gneiss migmatitiques, d'orthogneiss, d'amphibolites à reliques d'éclogites et de granites d'anatexie.

Le massif des Maures-Tanneron a été formé en même temps que l'Argentera-Mercantour, le Massif Central, le Massif Armoricain. Il forme la chaîne varisque qui résulte de la collision entre les deux super continents :

- la Laurasia au nord et le Gondwana au sud et qui a abouti, à la fin du Primaire, à la formation d'un continent unique ;
- la Pangée. Le massif des Maures a été séparé de la Corse au Tertiaire (Oligocène supérieur -34 Ma).

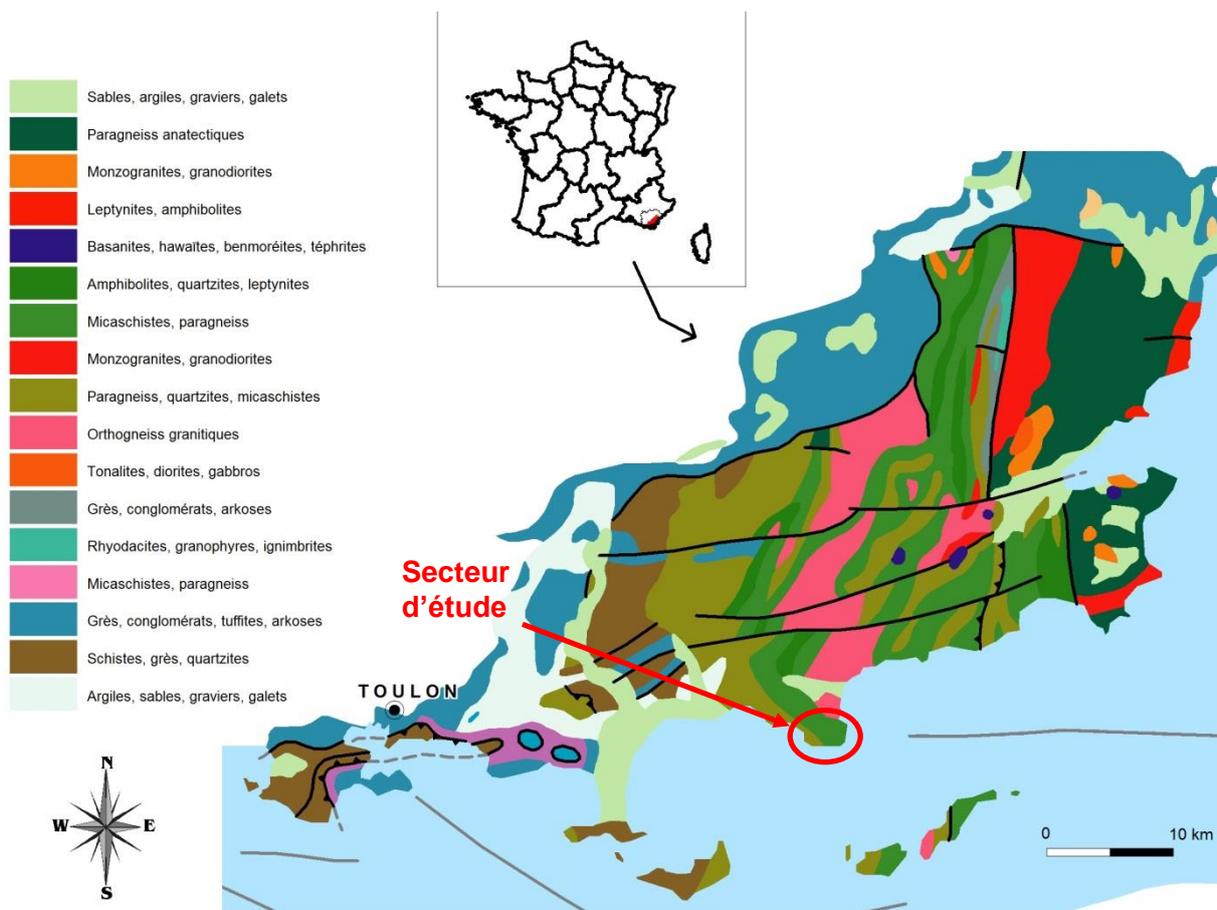


Illustration 8 : Carte lithologique simplifiée du Massif des Maures (source : lithologie 1/1 000 000 BRGM).

Le secteur d'étude se trouve donc dans l'unité occidentale, il se compose spécifiquement (du sud vers le nord de la zone) des lithologies suivantes :

- phyllades détritiques des Sauvettes : elle est majoritaire sur le site d'étude, couvrant la quasi-totalité des bassins-versants du Sud de la zone ;
- amphibolites et leptynites associés : elle est présente en une mince bande au Nord des Phyllades, uniquement sur la partie est de la zone. Elle disparaît à l'ouest de la faille traversant la zone d'étude légèrement à l'est du col de Patelin ;
- micaschistes détritiques à faciès de gneiss ;
- micaschistes stratigraphiquement indifférenciés : on les retrouve de part et d'autre des micaschistes à faciès de gneiss ;
- micaschistes à minéraux, stauroïdes et grenats.

Dans des travaux précédents menés sur ce secteur¹, le paramètre altération a été étudié spécifiquement sur ces formations cristallines, afin de comprendre le lien avec les instabilités. En effet, l'ensemble du massif des Maures a subi au cours du temps une histoire complexe qui l'a amené à se retrouver recouvert à plusieurs reprises par des séries volcaniques et sédimentaires puis remis en surface à la faveur de la mise en place des Alpes.

¹ BRGM/RP-65819-FR et Thiery *et al.* (2018)

Sur les cartes géologiques existantes concernant le Massif des Maures et du Tanneron (1065 – Hyères-Porquerolles ; 1064 – Toulon ; 1047 – Saint-Tropez Cap-Lardier ; 1046 : Collobrières ; 1024 : Fréjus ; 998 – Fayence ; 999 – Grasse-Cannes), il n’y a aucune information renseignant le régolite. Les observations faites sur le terrain dans le cadre de cette précédente étude du BRGM ont conduit à mettre en évidence qu’à l’affleurement la quasi-totalité des roches présentaient une altération plus ou moins intense. Deux phases d’altérations ont pu être caractérisées : l’altération ancienne dite « paléoaltération » et l’altération « morphologique » :

- la paléoaltération se caractérise par un profil épais de plusieurs dizaines de mètre constitué par une isaltérite reposant sur un horizon fissuré. Ce profil n’est présent que localement. Il est morcelé par des failles, basculé et fortement érodé par le réseau des rivières actuelles. Sa puissance suggère une mise en place lors d’une phase d’altération longue et stable ;
- l’altération « morphologique » affecte l’ensemble du massif. Récente, elle accompagne la formation du relief actuel qui résulte en fait d’une compétition entre altération et érosion. Elle est de faible épaisseur (d’une vingtaine de mètres maximum).

Les travaux menés ont permis de proposer une méthode exploratoire pour extraire rapidement les informations liées à l’altération des formations géologiques favorisant les instabilités (en particulier les glissements de terrain, mais cela peut concerner aussi les mécanismes d’érosion) à partir de la définition des niveaux d’altération pour chaque classe de formation géologique sensible aux instabilités et ainsi proposer l’élaboration d’un modèle conceptuel d’altération pour les massifs cristallins du sud-est de la France (Illustration 9). L’approche peut s’adapter à des échelles opérationnelles et les résultats doivent être une aide pour améliorer la connaissance sur la prédisposition et les facteurs déclenchants aux instabilités superficielles que l’on trouve notamment dans les massifs cristallins du sud-est de la France.

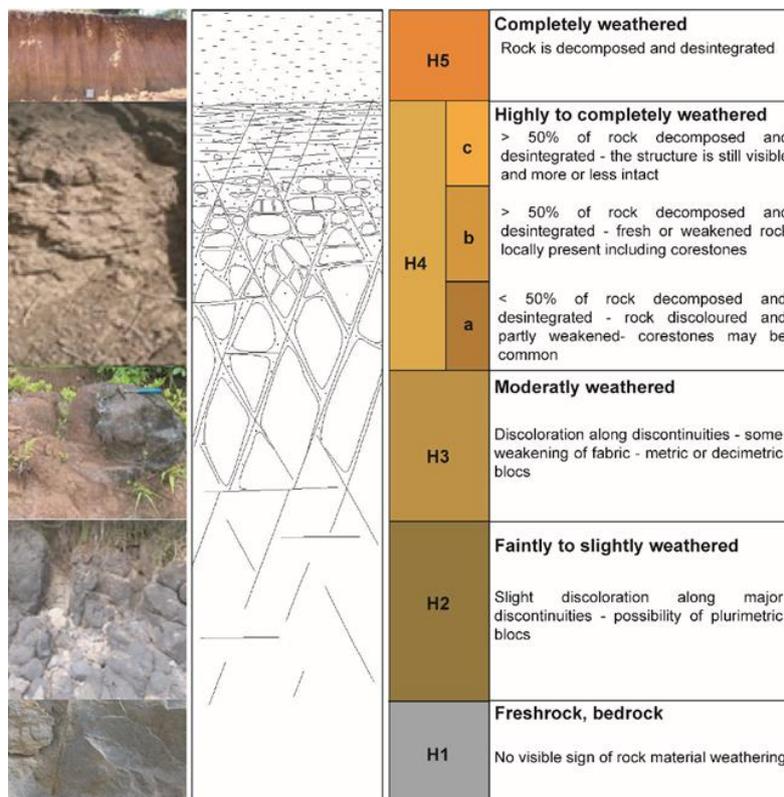


Illustration 9 : Profil idéal d’altération développé sur un substratum rocheux (adapté du Geological Society Engineering Group Working Party (1990) and Migoñ (2010)).

Ce modèle peut tout à fait s'appliquer au phénomène d'érosion superficielle. En effet, l'analyse a montré que parmi les différents contextes lithologiques, deux sont particulièrement favorables au processus d'altération avec une forte épaisseur de matériaux fortement altérés (à savoir les gneiss et micaschistes), mais l'analyse doit se poursuivre pour d'autres lithologies (par exemple les schistes et gneiss migmatitiques). Néanmoins il faut retenir de cette analyse que le modèle d'équilibre nécessite une attention particulière sur les aménagements ou autres constructions sur les pentes. Ceci se voit bien dans les modèles par le fait que malgré le rôle non négligeable de l'eau comme facteur déclenchant, modifier la forme de la topographie diminue d'environ 30% le facteur de sécurité et peut ainsi induire une rupture.

C'est pourquoi suite à ce travail, nous avons choisi de conserver dans le cadre cette étude la modification de la carte lithologique proposée par Thiery et al. (2018). Elle considère la géologie en fonction de ses caractéristiques mécaniques, ce qui amène à regrouper différentes classes aux comportements similaires.

Les classes retenues sur la zone d'étude sont donc les suivantes :

- des micaschistes, situés au nord d'un axe allant du fort du Cap Bénat jusqu'à la retenue d'eau située au nord du château de Brégançon :
 - détritiques à faciès de gneiss,
 - indifférenciés,
 - à minéraux, staurotides et grenats ;
- des phyllades détritiques, localisées au Sud de ce même axe ;
- des amphibolites et leptynites associées.

On notera par ailleurs la présence d'une faille traversant la zone d'étude. À l'ouest de cette faille, les amphibolites disparaissent pour ne laisser plus que deux formations : les micaschistes au nord et les phyllades au sud (Illustration 10).

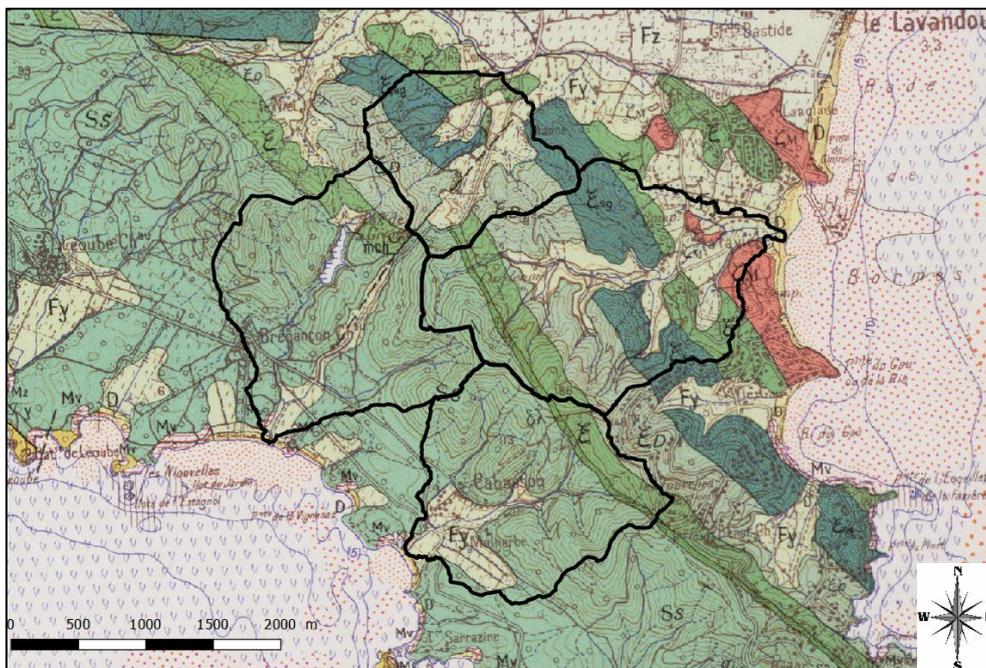


Illustration 10 : Cartes géologiques de la région d'étude (Carte BRGM au 1/50 000).

3.3. ÉPAISSEUR DES SOLS

Bien que la méthode pour renseigner les épaisseurs de régolithe proposée ci-dessus se soit révélée pertinente à des grandes échelles spatiales et pour des conceptualisations « géologiques », elle s'est finalement révélée peu représentative des observations de terrain menées afin de renseigner une épaisseur de sol représentative sur le bassin versant, et de sa variabilité spatiale. Nous entendons ici par « sol » l'horizon superficiel non-rocheux susceptible d'absorber l'eau de pluie et ruisselante. D'après la nomenclature présentée par Thiery et al. (2018), il s'agit donc principalement de l'horizon H5, H4c et H4b.

Ces observations ont donc été utilisées afin de choisir un modèle pertinent permettant de dériver l'épaisseur sur tout le bassin versant sur la base de paramètres topographiques. En effet, il existe de nombreux modèles dans la littérature (e.g. Catani *et al.*, 2010), et effectuer une carte représentative sur toute la zone d'étude sur la base de mesures aurait nécessité un travail de terrain d'une durée trop importante par rapport au dimensionnement du projet. Il est néanmoins important de souligner que cette caractéristique est un paramètre important du modèle, puisqu'il contrôle la capacité à stocker l'eau dans le sol qui, une fois dépassée, entraîne du ruissellement par saturation. Des études complémentaires devraient donc être menées afin de mieux cerner ce paramètre dans le cadre de futures études.

Les observations de terrain (Illustration 11) ont montré que l'épaisseur du sol était variable sur la zone d'étude. Sur les zones de crêtes et de manière générale dans les zones amonts, elle est plutôt faible, tandis qu'elle peut être plus épaisse en aval. Les chemins sont globalement dégradés mais présentent parfois des épaisseurs non-négligeables.

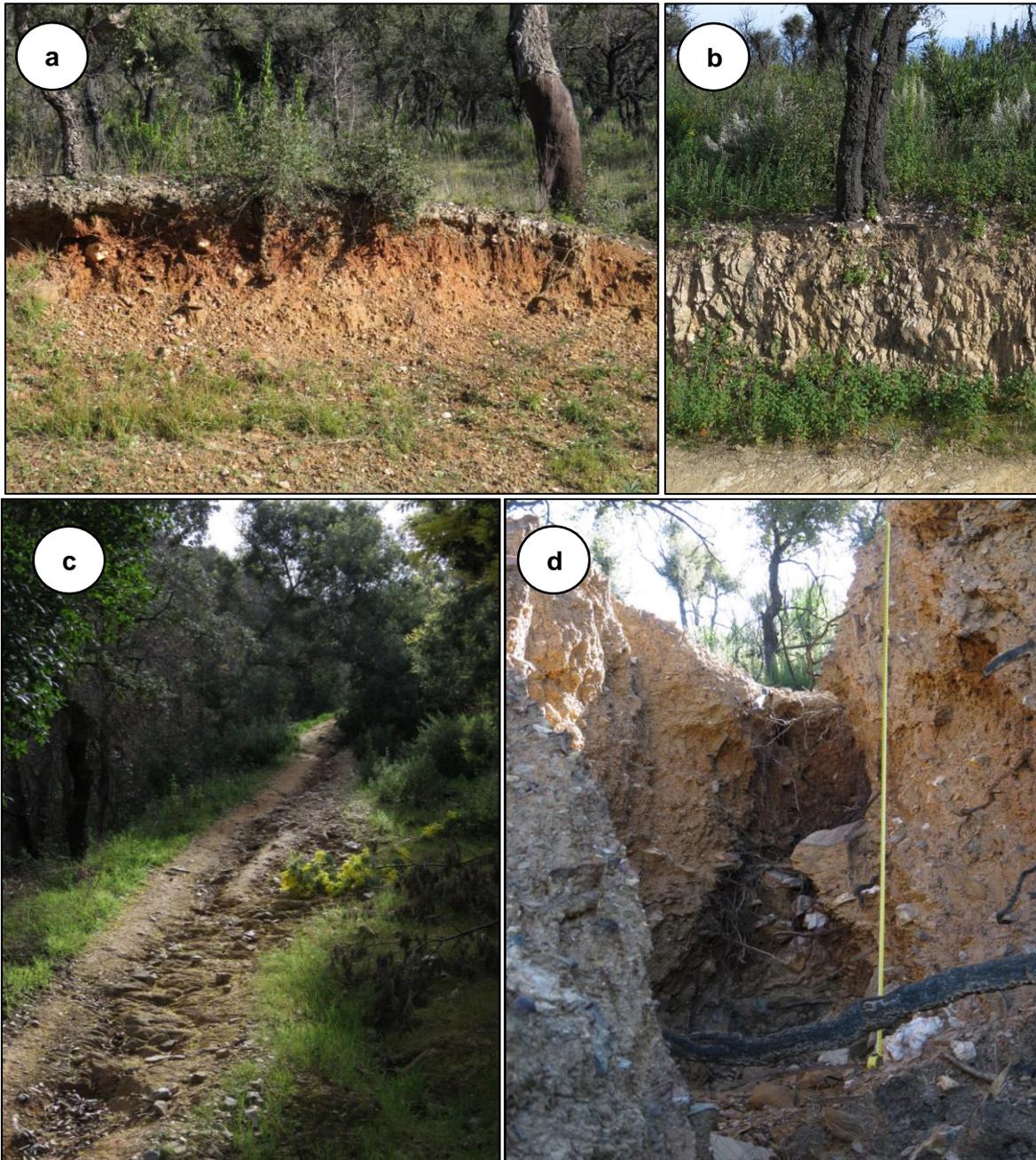


Illustration 11 : Illustration d'épaisseurs de sols rencontrées sur le terrain a) plutôt épaisse, dans une zone de bas-fond (ici au sud de la route de Cabasson) et b) plutôt faible, localisée sur des zones amonts du bassin versant (ici sur la redescente vers le chemin de Cardenon depuis les crêtes). c) et d) sont des photos prises sur des chemins, respectivement c) avec une épaisseur nulle à faible dans le vallon du Gaspardet et d) importante sur le chemin situé entre la route de Cabasson et la piste de Vincennes. Le mètre est déployé en d) sur une épaisseur de deux mètres. ²

Ces observations ont mené au choix de l'Indice de Beven-Kirby (IBK, Beven & Kirby, 1979) pour représenter l'épaisseur de sol. Cet indice se base à la fois sur l'aire drainée amont mais également sur la pente locale de chaque pixel.

² Sauf mention contraire, les photos présentées dans ce rapport sont issues de la mission de terrain effectuée entre le 5 et le 8 mars 2019.

L'indice de Beven-Kirby se définit comme :

$$IBK = \ln\left(\frac{a}{\tan(b)}\right)$$

Où :

- *IBK* est l'Indice de Beven-Kirby
- *a* est l'aire drainée en amont de chaque pixel
- *b* est la pente locale

Cet indice est ensuite normalisé, puis rapporté aux épaisseurs de sols minimales observées sur le terrain. Bien qu'initialement destiné à décrire un comportement hydrologique, cet indice s'est révélé pertinent pour décrire des épaisseurs de sols dans le cadre de cette étude. Le résultat de ce calcul (Illustration 12) montre des épaisseurs de sols plutôt faibles sur les versants, particulièrement dans les zones de forte pente.

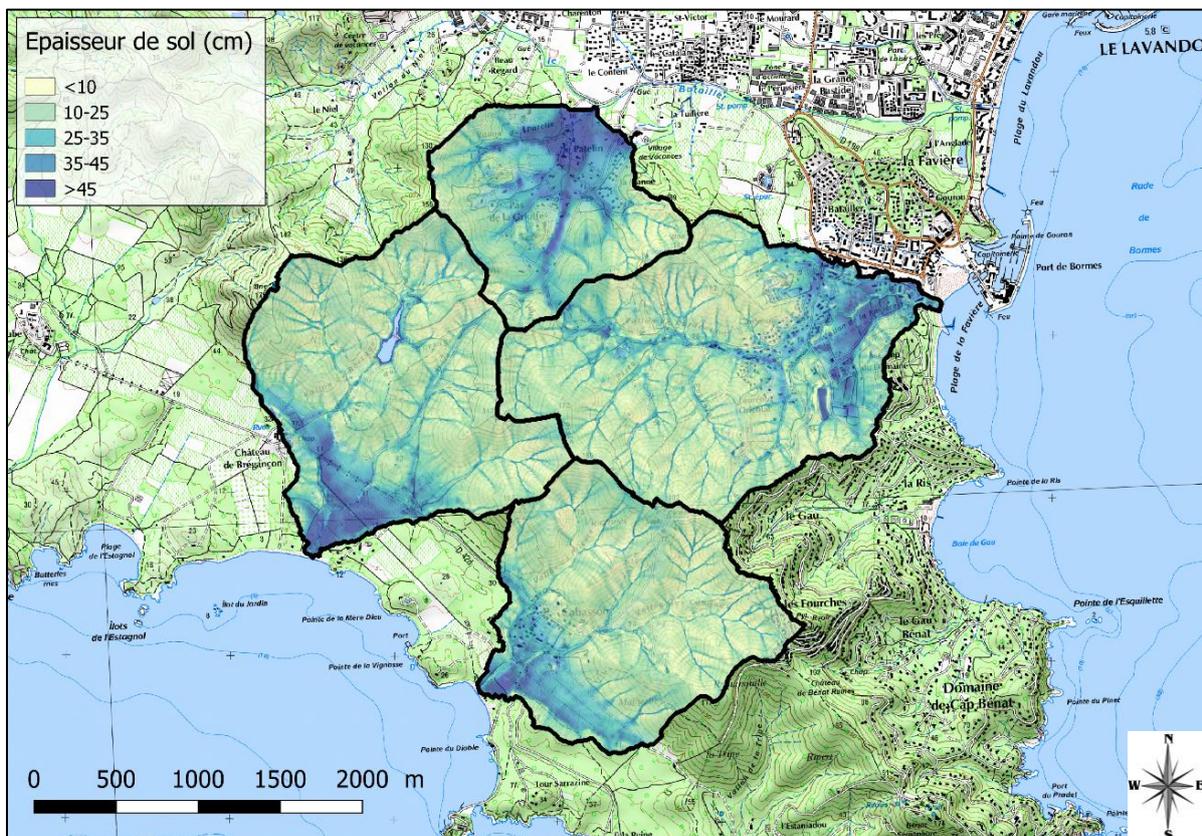


Illustration 12 : Épaisseur de sol calculée sur la zone d'étude, sur fond de carte Scan 25 IGN.

À l'inverse, dans les zones plus planes comme par exemple dans la partie Sud, au niveau des vignes du domaine de Léoube, ou proche de la zone côtière de Brégançon, l'épaisseur du sol est plus importante, en accord avec les observations de terrain. Il est à noter que les fonds de thalwegs, qui drainent localement des zones importantes avec des pentes plus faibles que celle des versants les entourant, présentent des épaisseurs plus importantes. Il a en effet été observé dans les thalwegs des atterrissements de matériaux fins, qui participeront activement à la rétention d'eau lors d'événements pluvieux. De plus, de par sa formulation l'IBK sera plus important dans les zones de plus faibles pentes des thalwegs, correspondant aux zones probables de dépôt de matériaux, ce qui est en accord avec ce qui pourrait être observé sur le terrain. Enfin, il est à noter que des zones peuvent disposer d'une réserve de sol, sans pour autant que celle-ci ne soit effective dans les modélisations. C'est le cas des zones dont

l'infiltrabilité est nulle ou très faible ; typiquement les zones urbaines, dont le revêtement limite très fortement l'infiltration en surface.

On notera que cette carte a été effectuée sur la base d'un modèle issu d'observations de terrain, mais qu'elle n'a pas fait l'objet d'une étude détaillée. Il est important de souligner à nouveau l'importance d'une meilleure description de ce paramètre pour de futures études.

3.4. OCCUPATION DES SOLS

Il est dans un premier temps nécessaire de définir les entités spatiales concernées par l'étude afin de leur attribuer des propriétés physiques (par exemple de capacité d'infiltration) en vue des simulations. Pour se faire, le parcellaire extrait de la BD Parcellaire est utilisé.

L'occupation des sols au sein de ces parcelles est déduite d'une combinaison entre les données fournies par le Registre Parcellaire Graphique (RPG), Corine Land Cover et les données issues du système d'information environnementales du Centre d'Études Spatiales de la BIOSphère. Ces deux dernières sources de données sont issues de traitement de données satellitaires, et notamment des missions Sentinel-2. Les traitements utilisés sont respectivement de l'interprétation de données, et l'utilisation d'apprentissage supervisé appliqué notamment aux données issues du RPG. Le RPG est, lui, une base de données servant de référence à l'instruction des aides de la PAC et directement renseigné par les exploitants/propriétaires de parcelles. Ainsi, ces données se basent sur des informations précises et locales (i.e. RPG) qui sont extrapolées à grande échelle via l'utilisation de données satellitaires.

Cependant, les résultats fournis par les images satellites peuvent être influencées par différentes sources d'erreur (e.g. présence de nuages, échantillon d'apprentissage trop restreint). L'effet principalement observé de ces erreurs est une mauvaise délimitation des parcelles et/ou une attribution erronée des types d'occupations du sol. Afin de limiter ces erreurs, les opérations suivantes ont été effectuées :

- problème de limite de parcelles : les limites de la BD Parcellaire sont utilisées, les occupations au sein de ses différentes entités sont récupérées, puis la parcelle entière se voit attribuer l'occupation majoritaire ;
- problème d'occupation des parcelles : une photointerpretation est effectuée sur la base des orthophotographies issues de la BD Ortho, dans le cas d'erreurs flagrantes (e.g. attribution d'un ou deux pixel d'occupation du sol très différent de toute la parcelle).

Ainsi, l'occupation des sols des différents sous-bassins versants a pu être quantifiée, pour l'année 2017 (Illustration 13).

Bassin versant	La Londe-Les Maures	Brégançon	Bormes-lès-Mimosas	Lavandou
Surface (km ² - %)	80 km ² - 48.5%	29.3 km ² - 18%	36.6 km ² - 22%	19 km ² - 11.5 %
Cultures d'été	0	0	0	0
Cultures d'hiver	0	0	0.3	0
Forêts de feuillus	0	0	0.1	0
Forêts de conifères	53	37	27	27
Pelouse et prairie	1.5	1.5	2.2	1.8
Lande ligneuse	24.5	34.4	42.9	47.5
Bâti	6.9	13	20.6	22.9
Routes et rochers	0	0.2	0	0.2
Eau	0.1	1.2	0	0.1
Vergers	0.5	1.8	0.5	0
Vignes	13.1	10.9	6.5	0

Illustration 13 : Superficie et occupation du sol des différents sous-bassins versants de la zone du PAPI côtier des Maures (en pourcentage). A noter : certains 0 correspondent à des proportions très faibles au regard de la taille du territoire et pas à l'absence de détection (e.g. les routes).

La classification initialement proposée par les différentes bases de données propose des classes non représentées dans la zone d'étude (typiquement les zones englacées) ; celles-ci ne seront donc pas considérées dans la suite de cette étude. Par ailleurs, cette occupation générale de la région a ensuite été étudiée sur les sous-bassins versants propres spécifique à cette étude (Illustration 14). Les classes ont été simplifiées en supprimant celles qui n'étaient pas représentées.

Bassin versant	Totalité	Patelin	Favière	Brégançon	Léoube
Surface (km ² - %)	9.15 – 100%	1.38 – 15%	3.03 – 33%	2.56 – 28%	2.18 – 24%
Forêts	36.1	30.1	29.7	52.6	33.3
Pelouse et prairie	1.9	6.4	1.7	0	1.5
Lande ligneuse	40.1	35.7	41.5	26.9	51.9
Bâti	6.4	7.8	12.6	4	0.2
Routes et rochers	9.5	16.4	11.7	9	3.3
Eau	0.2	0	0	0	0.6
Vergers	0.2	0	0	0	0.9
Vignes	5.6	3.6	2.8	7.5	8.3

Illustration 14 : Superficie et occupation du sol des différents sous-bassins versants de la zone d'étude, en pourcentage.

Les bassins versants étudiés sont majoritairement occupés par des forêts et des landes ligneuses, leur alternance reflétant les variations locales de végétation, et sont représentatifs en terme d'occupation des sols de la zone d'étude du PAPI. Quelques zones (Patelin et Léoube) sont plus fortement urbanisées, tandis que d'autres présentent une part importante de vignes (Brégançon et Léoube). Leur répartition spatiale est présentée en Illustration 15.

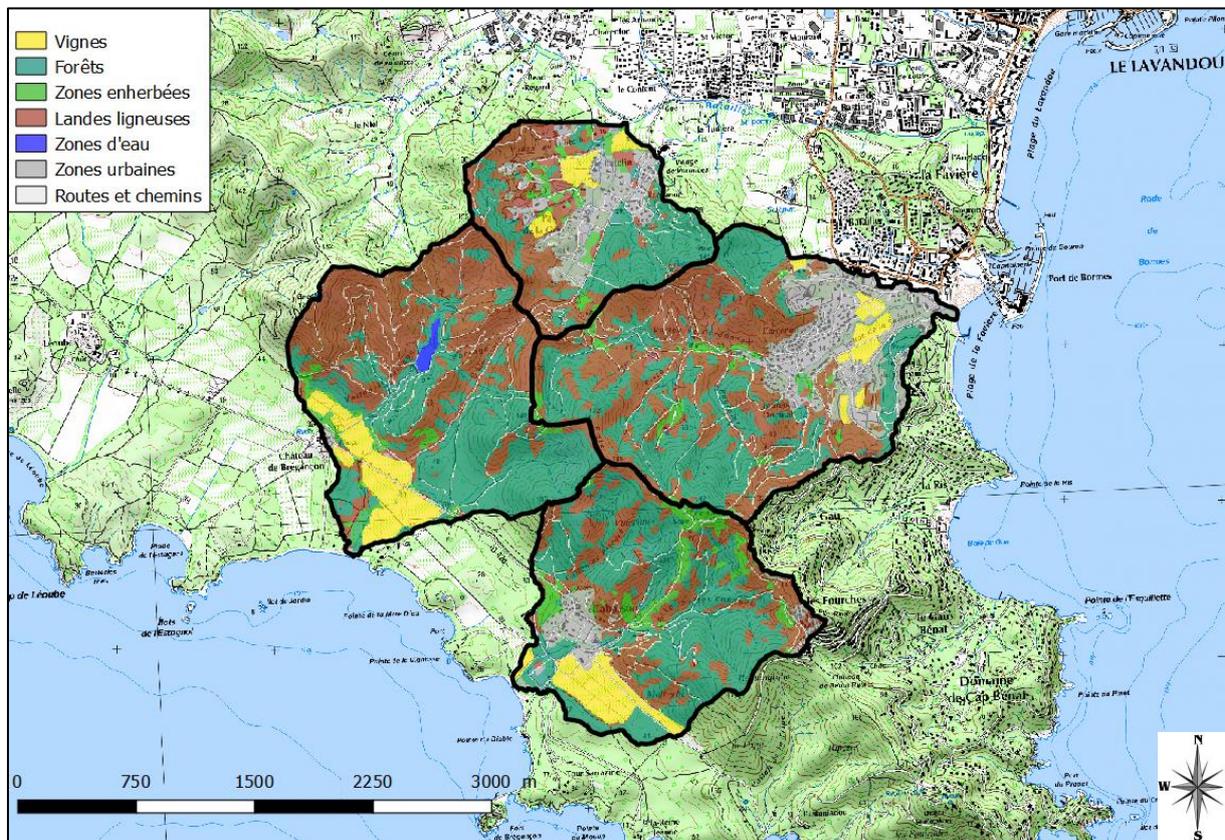


Illustration 15 : Occupation des sols retenue dans le cadre de cette étude sur fond de Scan25 IGN.

3.5. EMPRISE DE L'INCENDIE, ÉVOLUTION TEMPORELLE ET REPRISE DE LA VÉGÉTATION

Il est important de noter que l'étude a démarré en 2019. L'évaluation de l'incendie et de ses effets a donc été effectuée à posteriori. Elle ne permet donc pas de juger de la vitesse de la reprise de la végétation durant les premiers mois. La totalité des informations pour la période antécédente à 2019 a été effectuée sur la base d'informations extérieures, sans suivi de terrain.

L'emprise de la zone incendiée a été reprise du suivi mené par l'Office National des Forêts (ONF), établie au cours de leur étude Restauration des Terrains Incendiés publiée en 2018 (Illustration 16). L'incendie de la région a touché une surface totale de 1 423 ha, dont 594 ha se situent sur les bassins versants de l'étude. Par ailleurs, la base de données Corine Land Cover fournit une cartographie de la zone incendiée pour l'année 2018. Même si cette base de donnée est moins précise que le relevé effectué par des experts sur le terrain, elle permet d'avoir un aperçu de l'évolution temporelle de la zone incendiée.

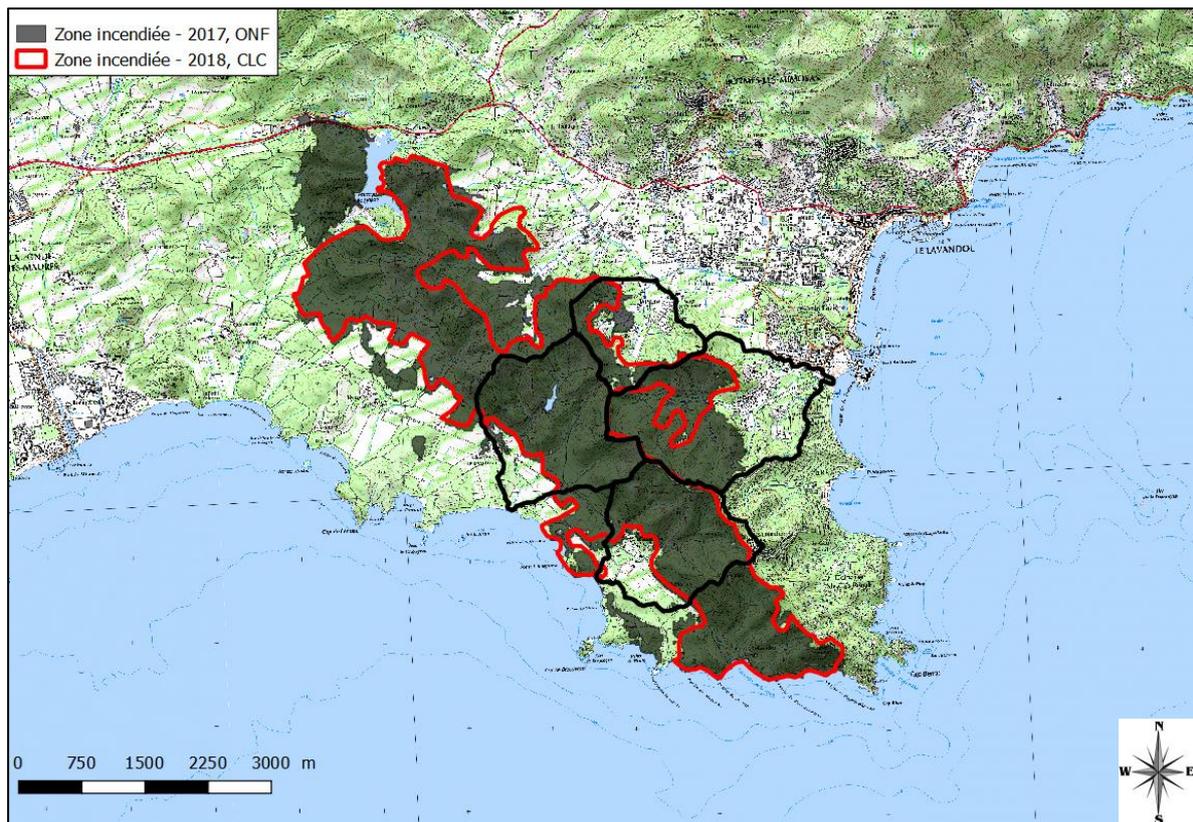


Illustration 16 : Détermination de la zone incendiée telle que déterminée par l'ONF pour l'année 2017 (en fond grisé et par Corine Land Cover pour l'année 2018 (en contour rouge) sur fond de carte Scan 25 IGN.

Ainsi, 1088 ha ont été identifiés comme zone incendiée sur les terrains d'étude en 2018, dont 476 font partie de la zone d'étude, soit une différence de 118 ha. Cette différence s'explique en partie par la différence de méthodes de relevés, mais également par une reprise de la végétation après l'incendie de l'été 2017. En effet, notamment suite aux précipitations importantes de la fin de l'année 2017 et de l'année 2018, celle-ci a globalement entamé sa reprise sur le terrain, mais néanmoins de manière hétérogène (Illustration 17). Ceci est particulièrement notable dans les zones les plus périphériques de l'incendie, notamment dans les vallons de Cardenon et du Gaspardet. Il est intéressant de noter qu'une telle reprise de la végétation a également été observée dans d'autres contextes géographiques (e.g. en Grèce - Soulis *et al.*, 2012), suggérant une dépendance aux caractéristiques locales des précipitations.

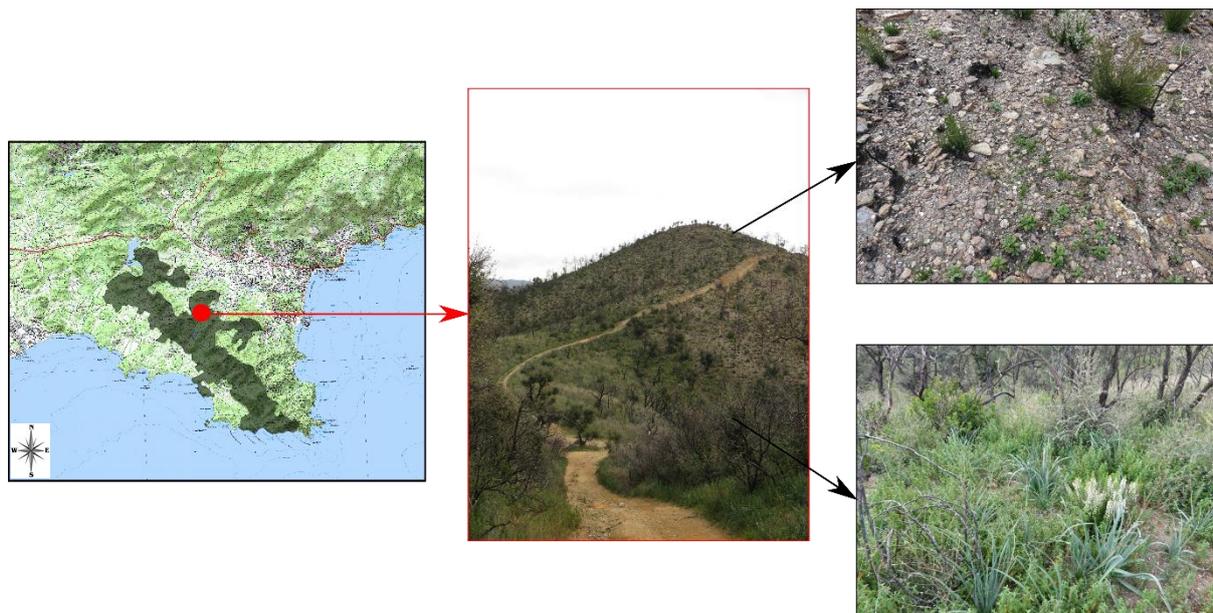


Illustration 17 : Variations de la reprise de la végétation sur le site. La distance entre les deux prises de vue est d'environ 200 mètres, et toutes deux se situent dans la zone détectée comme incendiée.

Ces observations sont cohérentes avec les observations et préconisations de l'ONF qui, dans son rapport, supposait que « la survie de ces semis dépendra beaucoup des conditions climatiques de l'été et de l'automne 2018 », mais également que « La régénération viable sera nettement plus visible au printemps 2019 » (Tessier du Cros, 2018). Sur le territoire de l'étude, 65 % de la zone est caractérisée comme affectée par l'incendie.

Les observations de terrain ont suggéré que la transition entre zone de reprise et de non-reprise de la végétation pouvait en partie être liée au matériau géologique en place. En effet, cette transition entre zone avec reprise importante de la végétation et reprise moindre s'opère au niveau de la transition entre les phyllades détritiques des Sauvettes et des micaschistes (Illustration 10). Thierry *et al.* (2018) ont en effet montré que ces phyllades sont susceptibles d'être plus facilement altérées, créant une couche d'altération probablement plus propice au développement de la végétation. Cette reprise a par ailleurs dû être conditionnée par la vitesse de propagation du feu la sévérité locale de l'incendie, cette dernière ayant été identifiée comme forte sur la quasi-totalité de la zone d'étude. Ce processus de reprise dépend de toute manière de nombreux facteurs locaux dont le détail dépasse le cadre de cette étude. Néanmoins, les observations de terrain ont permis de répertorier les zones sur lesquelles la reprise a été forte, et celle où elle a été moindre (Illustration 18), donnée importante pour l'établissement de cartes pertinentes pour la modélisation du ruissellement et de l'érosion. Il n'a pas été observé de lien entre la localisation de ces zones et la topographie, l'exposition du terrain ou sa pente. L'occupation des sols avant incendie telle que présentée par les données acquises dans le cadre de cette étude ou de manière plus fine par essence par l'ONF dans son rapport (Tessier du Cros *et al.* 2018) ne montre pas non plus de tendance préférentielle. Nous supposons donc que ces zones particulièrement impactées résultent de la combinaison de facteurs locaux et ne les différencierons donc individuellement pas dans la suite.

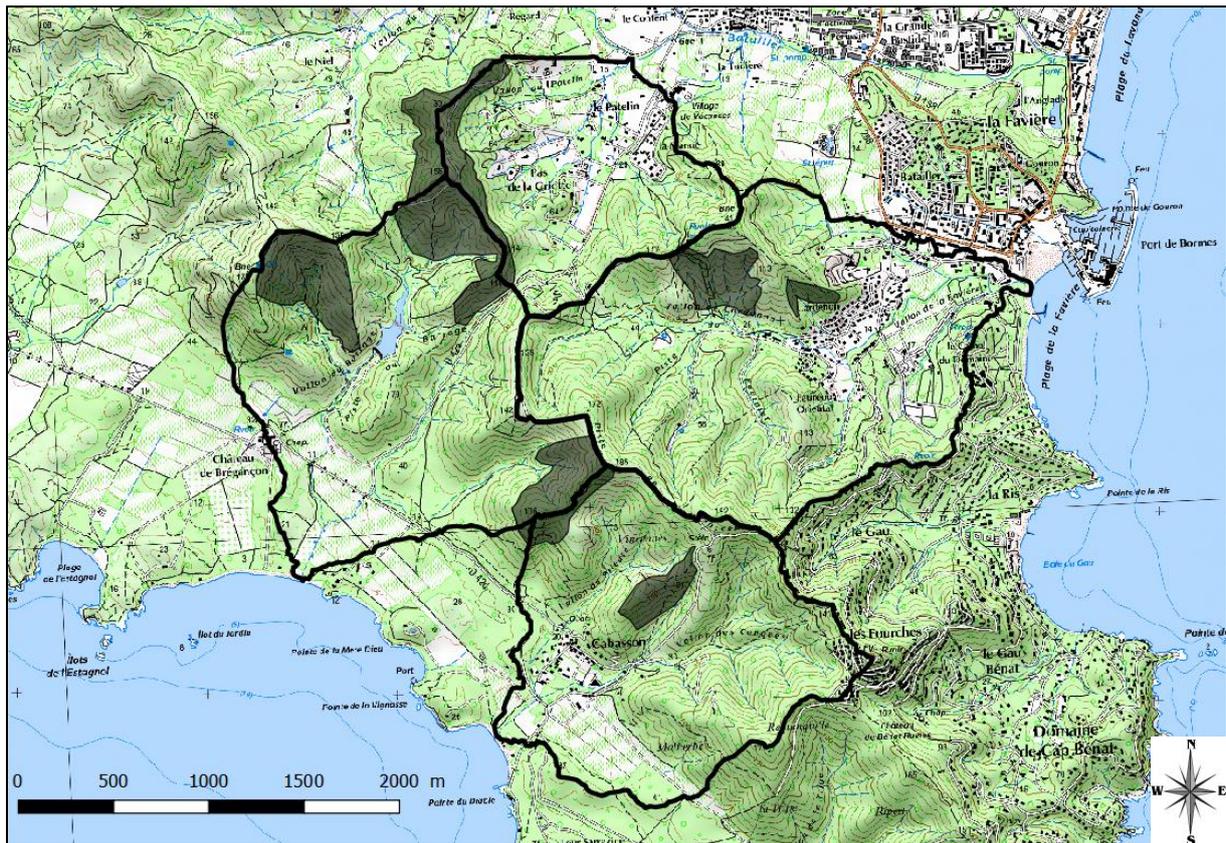


Illustration 18 : Emprise des zones de moindre reprise de la végétation sur le terrain d'étude (en grisé) sur fond de cart Scan 25 IGN.

3.6. IMPLICATION POUR LA CLASSIFICATION DES ZONES INCENDIÉES

La stratégie de modélisation choisie dans le cadre de cette étude implique de définir, outre un état de surface qui reflète notamment la végétation en place, des classes de sévérité d'incendie définies comme « intermédiaire » ou « forte ». Les données collectées auprès de l'ONF qualifie l'incendie dans la classe la plus importante sur la zone d'étude. Si les photographies aériennes confirment cette impression en terme de couvert forestier, l'impact sur le sol et donc l'hydrologie et l'érosion peut être plus contrasté. Le croisement des données acquises par ailleurs avec le retour des acteurs du terrain et les observations menées lors d'une mission de terrain ont mené à établir une classification plus nuancée pour une finalité hydrologique. Ainsi, les zones classées comme non impactées ont été conservées telles quelles. Les zones de faible reprise de la végétation identifiées sur le terrain (Illustration 18) ont été classées comme zone d'incendie de classe « forte ». Le reste des zones incendiées a été classée comme zone d'incendie de classe « moyenne ». La classification résultant de cette combinaison d'observation (Illustration 19) montre que la majorité de la zone incendiée s'étend du nord-ouest au sud-est, la majorité étant concentrée sur le versant Sud de la zone d'étude, principalement sur les bassins-versants de Léoube et de Brégançon.

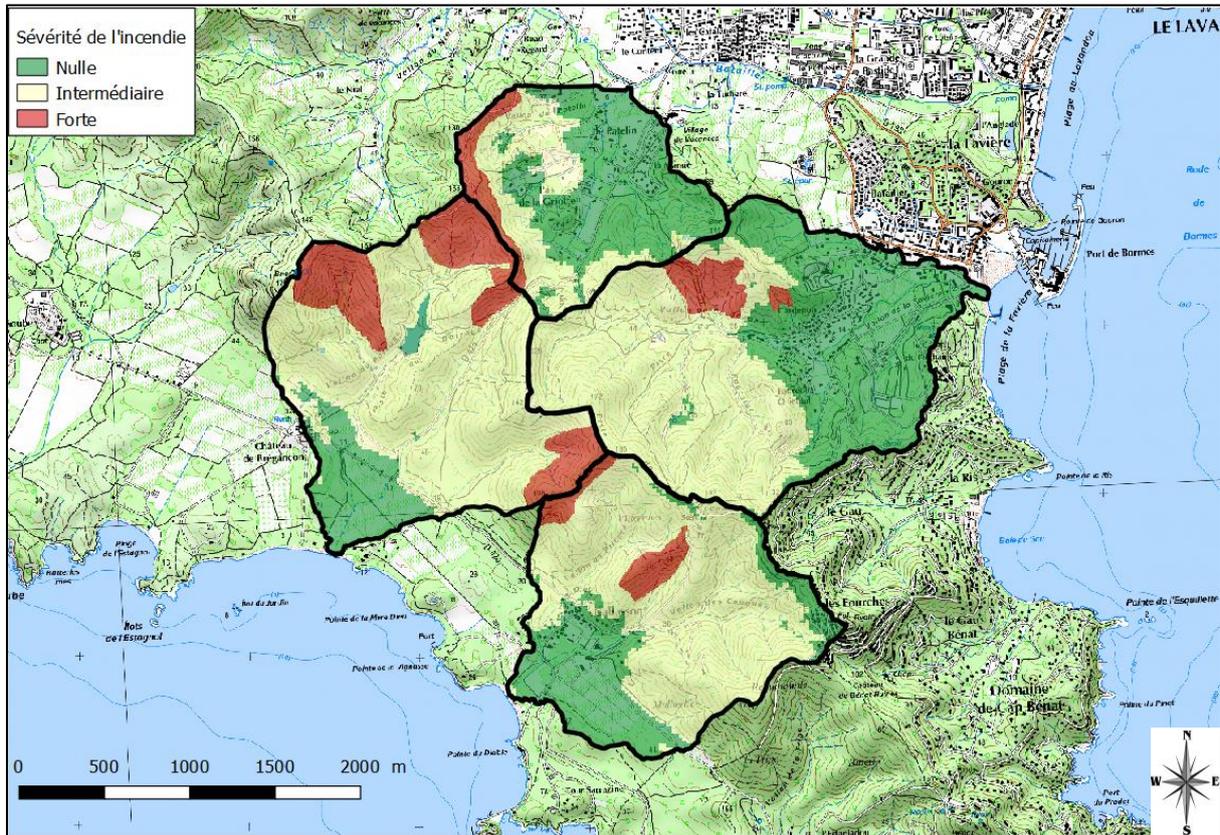


Illustration 19 : Proposition d'adaptation des zones incendiées, ici pour l'année 2017, incluant observations de terrain, retour d'expérience et données obtenues a priori auprès de l'ONF et par Corine Land Cover, sur fond de carte Scan 25 IGN.

Les zones de sévérité les plus importantes se situent au cœur des zones d'intensité intermédiaire, signe probable de « noyaux » particulièrement importants de feux lors de l'incendie. La comparaison des données acquises par Corine Land Cover pour l'année 2018 avec celles acquises auprès de l'ONF, datées de 2017, permettent par ailleurs d'établir deux cartes. En ne conservant par ailleurs que les zones observées comme présentant peu de reprise de végétation sur le terrain comme brûlées en 2019, nous disposons ainsi d'un aperçu de l'évolution temporelle de la reprise de la végétation à trois dates données (Illustration 20).

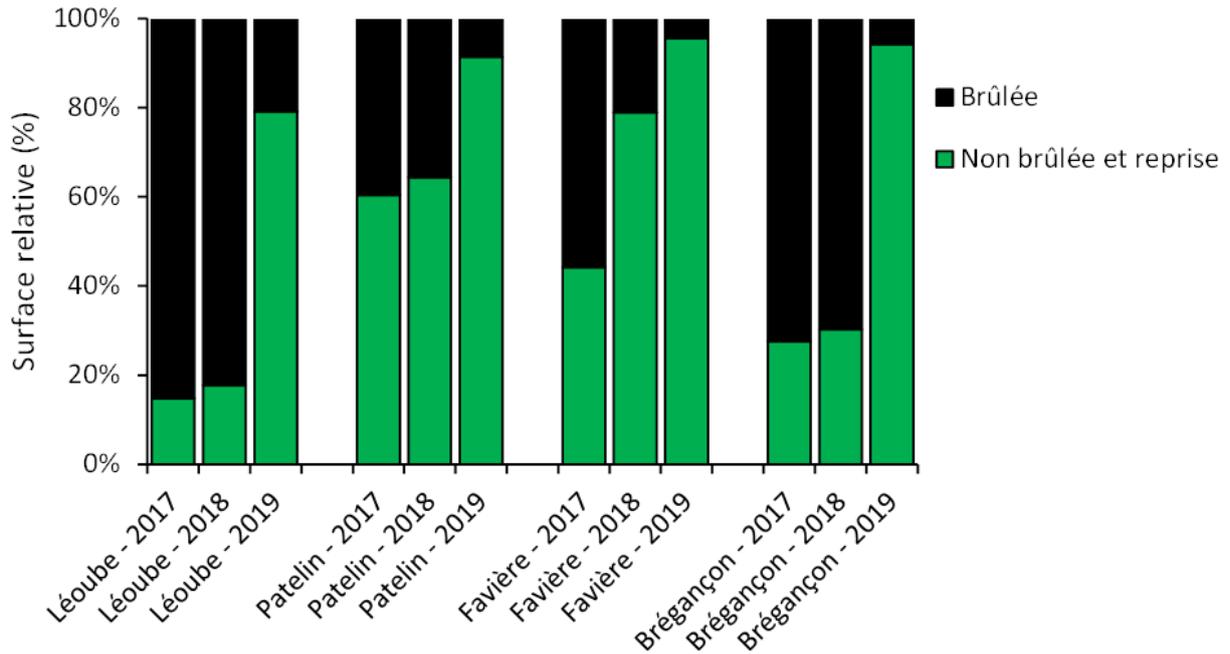


Illustration 20 : Évolution des zones brûlées par bassin versant et par année.

Il est à noter que nous désignons ici comme surface « non brûlée » les zones sur lesquelles la repousse de la végétation a été significative (comme illustré par exemple en illustration 17). Ainsi, des zones signalées comme brûlées en 2017 peuvent être par la suite désignées comme non-brûlées. La compilation de ces données met en évidence une reprise de la végétation significative bien que non complète (Illustration 21).

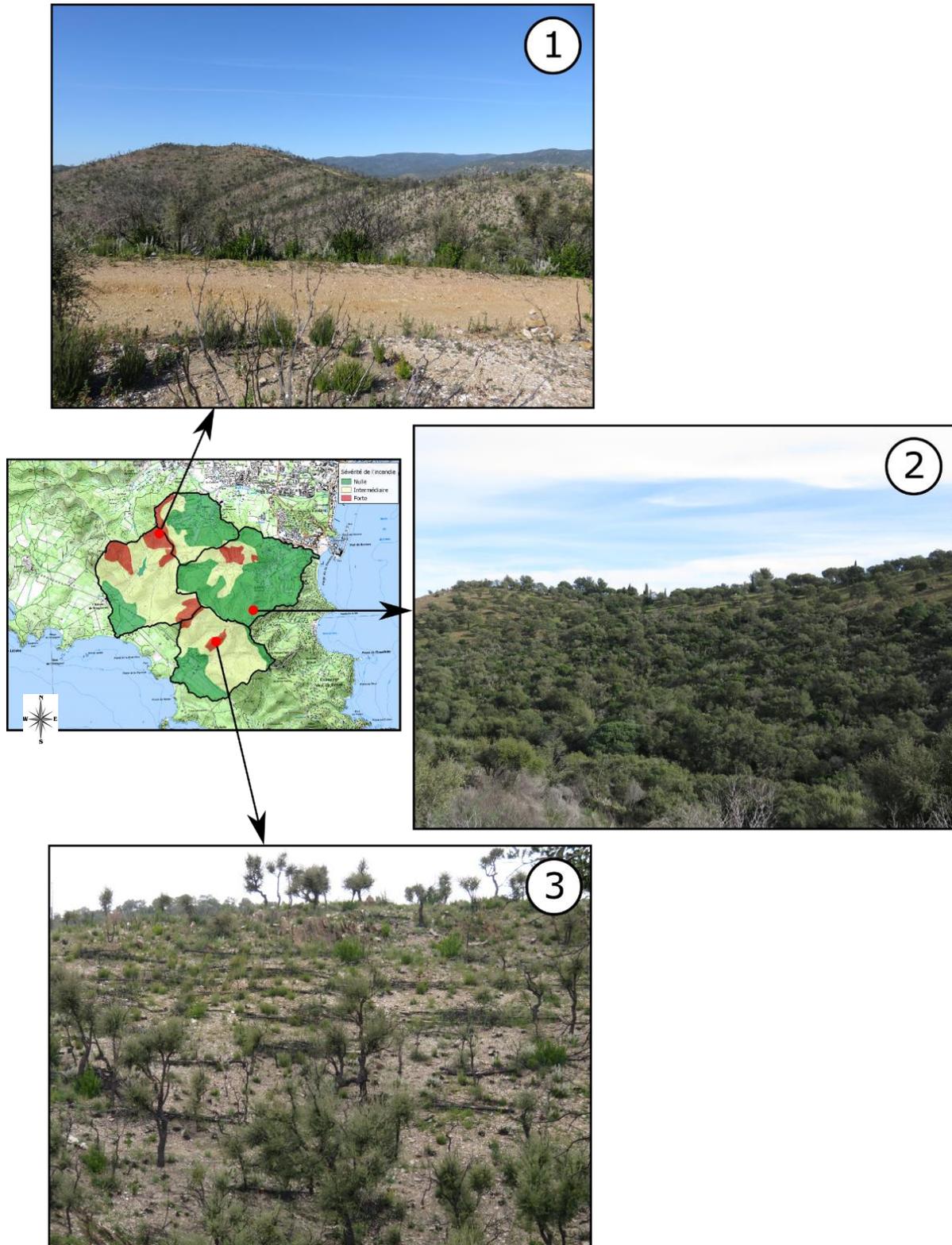


Illustration 21 : Exemple de zone sur laquelle la végétation 1) est toujours peu réinstallée 2) s'est rétablie et 3) de fascines installées sur terrain incendié.

La persistance de zones brûlées lors des observations de terrain de 2019 se reflète particulièrement sur le bassin versant de Léoube, dont plus de 20 % de la surface présente encore un sol sur lequel la végétation ne montre de signes que d'une reprise limitée. Cette région fortement impactée est principalement située autour de la retenue localisée en amont, dans la partie nord-est du bassin versant, mais également sur la ligne de crête de séparation

avec le bassin versant de Brégançon. Ce dernier présente des zones encore fortement impactées localement (représentant environ 5 % du bassin versant), notamment dans le vallon situé entre le vallon du Prieuré et celui des Conques, où des fascines ont été installées suite à l'incendie. Le même constat s'applique au bassin versant de Favière, avec une zone fortement impactée, mais également à la périphérie du bassin de Patelin.

3.7. CHOIX DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES POUR LES SIMULATIONS

3.7.1. Évènements décennal et cinquantennal

En accord entre les services techniques de Bormes-les-Mimosas et la SCP, il a été convenu d'étudier deux événements pluvieux correspondant à deux périodes de retour : un événement décennal et un événement cinquantennal. Les caractéristiques des événements ont été déterminées sur la base de statistiques établies pour la région. Il s'agit donc d'analyser les effets, respectivement, d'un événement de cumul 50 mm et 70 mm se produisant sur une heure. Le hyétogramme de ces événements a été calqué sur un événement intervenu au Cap Cépet du 24 septembre 2006 (Illustration 22). Celui-ci est en effet, est considéré comme un événement de référence par le bureau risques de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer du Var (DDTM83 – Communication orale de la SCP).

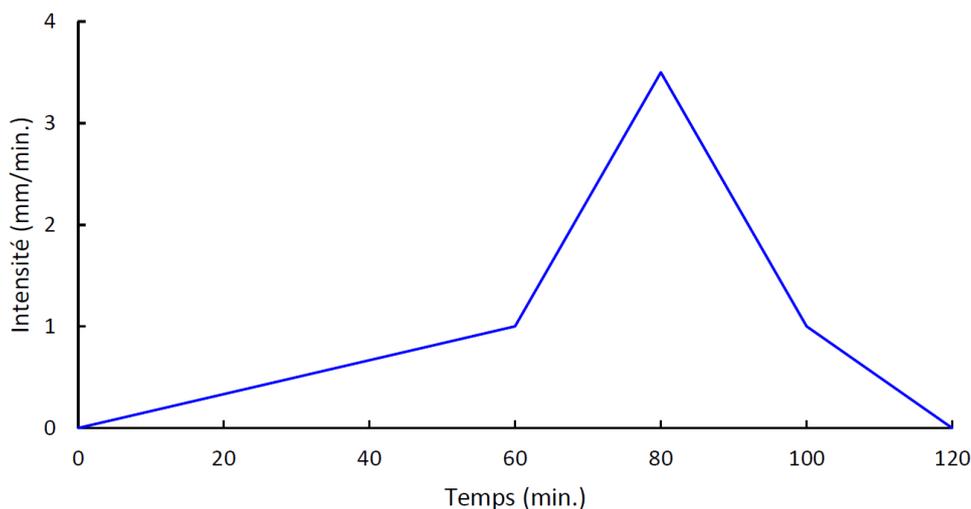


Illustration 22 : Évènement de référence survenu au Cap Cépet servant de référence en terme de hyétographe à cette étude.

Par ailleurs, la réponse ruisselante et érosive d'un bassin versant à une pluie donnée peut être fortement conditionnée par l'état hydrique initial des sols. Il a donc été choisi d'effectuer les simulations des deux événements pluvieux sur un sol initialement sec et un initialement humide. Les simulations sont menées après 0,5 mm de pluie dans le cas dit « sec », et après 10 mm de pluie pour le cas dit « humide ». L'évènement décennal et cinquantennal sont présentés en illustration 23.

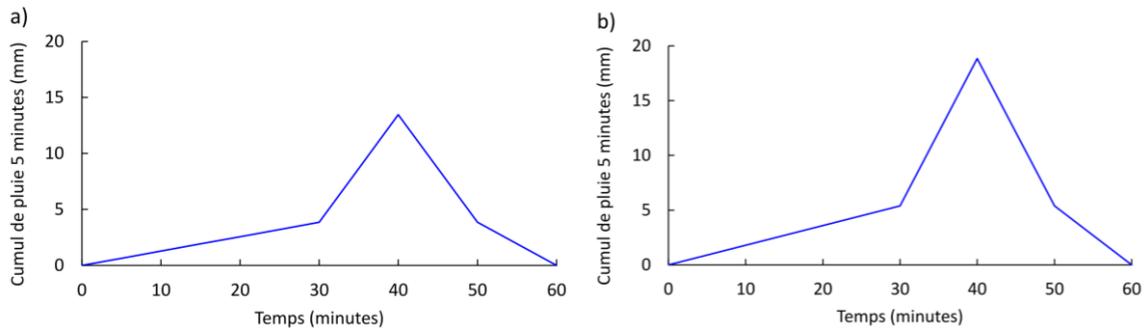


Illustration 23 : Évènements retenus dans le cadre de cette étude : a) pluie décennale et b) pluie cinquantennale.

3.7.2. Évènement extrême

La région est soumise à des évènements particulièrement intenses et présentant de forts cumuls de pluie. Ces évènements étant par définition peu fréquents et difficiles à capter précisément, il a été choisi de recourir aux données de Météo France, car elles présentent l'avantage de recenser les évènements pluviométriques remarquables de manière systématique, normée et de bénéficier de leur expertise sur ces sujets particulièrement sensibles. Ainsi, sur le Var, 34 évènements remarquables ont été enregistrés pendant les 20 dernières années (de 1998 à 2018).

Parmi ces évènements, un évènement récent a été sélectionné pour analyse. Il s'agit de celui qui s'est produit entre le 18 et le 19 janvier 2014, pour lequel on dispose de données à la station de La Londe-Les Maures (Illustration 24).

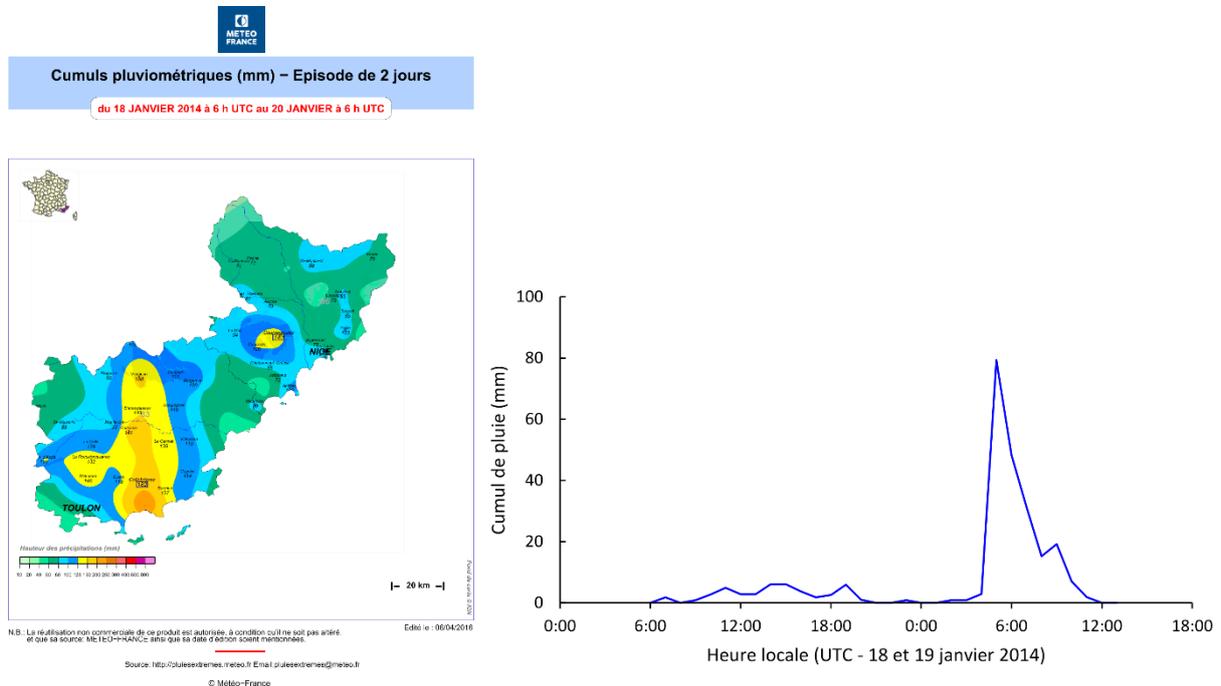


Illustration 24 : Carte radar de l'évènement pluvieux sélectionné (source : Météo France, portail « Pluies extrêmes ») et hyétoigramme correspondant.

Au cours de celui-ci, de fortes inondations se sont produites dans le département. D'après l'analyse de Météo France (récoltée sur le site « Pluies extrêmes »³), cet évènement s'est produit en deux phases : un premier épisode pluvieux a apporté de 50 à 150 mm de pluie sur le Var le 16 janvier 2014. Ces pluies ont participé à une saturation des sols, en plus d'un premier épisode de ruissellement probable. Puis un deuxième évènement pluvieux de 251 mm s'est produit entre le 18 et le 19 janvier, lui-même divisé en deux phases : un premier épisode d'intensité modéré présentant un cumul de pluie de 44 mm, puis un deuxième épisode particulièrement important, présentant un cumul de 207 mm qui a été particulièrement intense entre 5 h et 8 h du matin. En effet, cette période concentre à elle seule un cumul de 174 mm, soit 69 % du cumul total de pluie, avec une intensité maximale de l'ordre de 80 mm.h⁻¹ sur un pas de temps de mesure d'une heure.

3.7.3. Caractéristiques des évènements modélisés

Les principales caractéristiques des évènements pluvieux, ainsi que leurs années d'application, sont résumés en illustration 25.

Pluie Variable	Cumul de pluie (mm)	Durée (min)	Intensité maximale (mm.h ⁻¹)	Pluie antécédente (mm)
Décennal	50	60	60	0,5, 10
Cinquantennal	70	60	80	0,5, 10
Évènement extrême	207	840	80	44

Illustration 25 : Résumé des caractéristiques des évènements pluvieux modélisés.

Il est à noter que la méthode de construction schématique des hyétogrammes pour les évènements de période de retour 10 ans et 50 ans amène à considérer une intensité maximale de 80 mm.h⁻¹ et 100 mm.h⁻¹, respectivement pour l'évènement décennal et cinquantennal, alors que les mesures Météo France donne une intensité pour l'évènement extrême de 80 mm.h⁻¹. Il a ainsi été choisi de ramener l'intensité de l'évènement cinquantennal à 80 mm.h⁻¹ faute d'informations supplémentaire et en supposant qu'il s'agit d'un maximum et celle de l'évènement décennal à 60 mm.h⁻¹, la durée étant la même que l'évènement cinquantennal, par proportionnalité selon le cumul. Pour l'évènement extrême, il n'a pas été choisi de faire varier les pluies antécédentes i) afin de rester fidèle à l'évènement observé ii) afin de ne pas multiplier les scénarios et iii) étant attendu par ailleurs que ceci ne fasse pas varier les simulations de manière significatives. En effet, le cumul de pluie est important, ainsi il est attendu que des variations de dix millimètres ne fassent pas varier significativement les résultats.

Il est important de noter que lors de la totalité des modélisations, faute d'observations et du fait de la taille restreinte de la zone d'étude, limitant l'emploi de données radar, la pluie est supposée être distribuée de manière homogène sur le territoire.

³ <http://pluiesextremes.meteo.fr/>

3.8. INVENTAIRE DE TERRAIN ET AMÉLIORATION DE LA DONNÉE TOPOGRAPHIQUE

Au cours de la mission de terrain (effectuée du 4 au 8 mars 2019), un total de 64 ouvrages présents sur le territoire a été inventorié manuellement, et leurs caractéristiques géométriques relevées (Illustration 26). En effet, l'information ne semblait pas disponible (communication orale des services techniques de Bormes-les-Mimosas). Par ailleurs, ces ouvrages représentent des points qui peuvent se révéler particulièrement sensibles au cours d'évènements pluvieux.

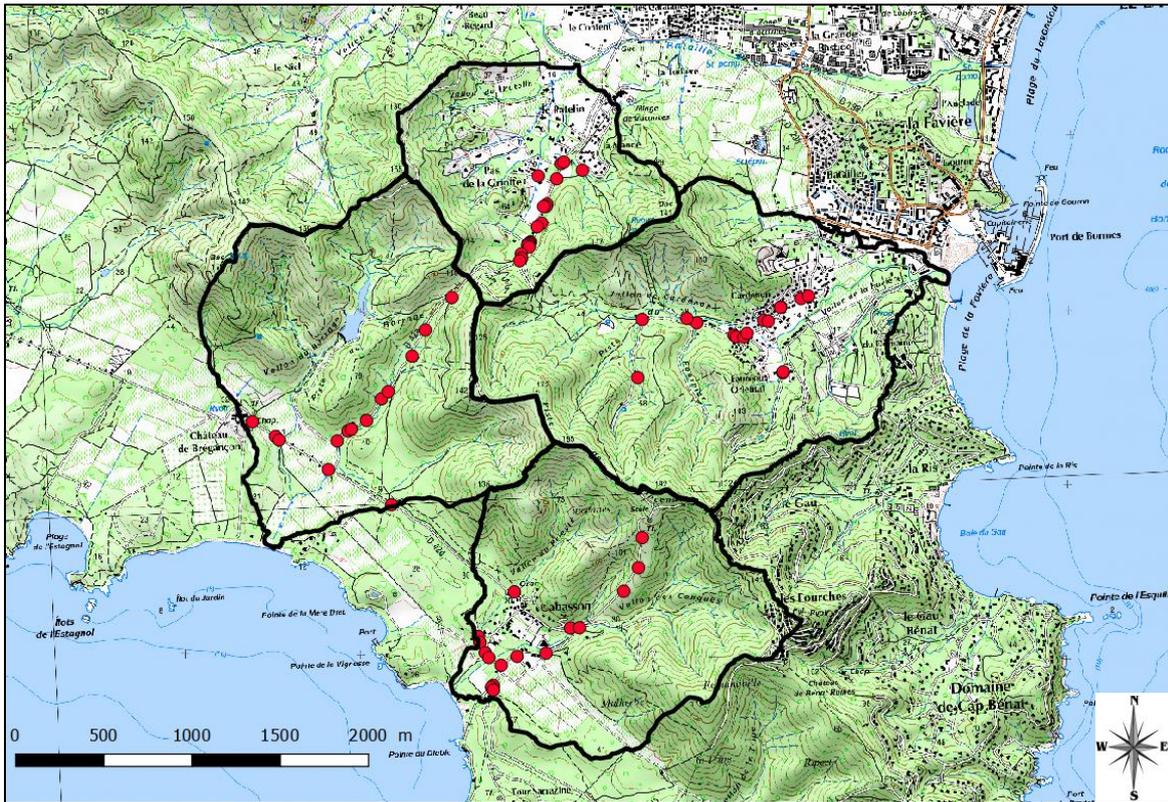


Illustration 26 : Localisation des ouvrages relevés sur le terrain, présents sur la zone d'étude, sur fond de carte Scan 25 IGN.

Par ailleurs, au cours de cette mission, les chemins d'écoulements, tels qu'initialement décrits par le MNT et la base de données Carthage ont été précisés. En effet, le MNT ne reflète souvent qu'une réalité imparfaite du terrain, notamment du fait de leur résolution. Typiquement, les fossés et les buses sont des éléments anthropiques qui n'y figurent pas. Or ces structures sont susceptibles de fortement modifier les écoulements à une échelle locale et, *in fine*, à plus grande échelle, en aval. Au cours de la mission de terrain, il a par ailleurs été remarqué que les chemins, qu'ils soient pédestres ou de circulation tels que les pistes de Défense des Forêts Contre les Incendies (DFCI) semblaient affecter de manière notables les écoulements. En effet, les écoulements depuis les thalwegs sont, sur cette zone d'étude, quasi-systématiquement déviés lors de leur arrivée sur les pistes pour suivre leur tracé. Ce comportement n'était pas non plus capté par le MNT, du fait d'une résolution trop grossière. Il a donc été adapté afin de mieux refléter ce comportement, important pour le transport solide puisque la conséquence observée a été un ravinement généralisé des pistes.

Le MNT a donc été adapté afin de faire correspondre les chemins d'écoulements observés et ceux simulés. Les résultats de ce traitement montrent une meilleure prise en compte des chemins d'écoulements au niveau des fossés de bords de route (Illustration 27, point 1), des buses traversant les voies de communication (Illustration 27, point 2) et enfin une prise en

compte des chemins comme voie préférentielle de transfert du ruissellement, avec ses effets sur l'érosion des sols (Illustration 27, point 3).

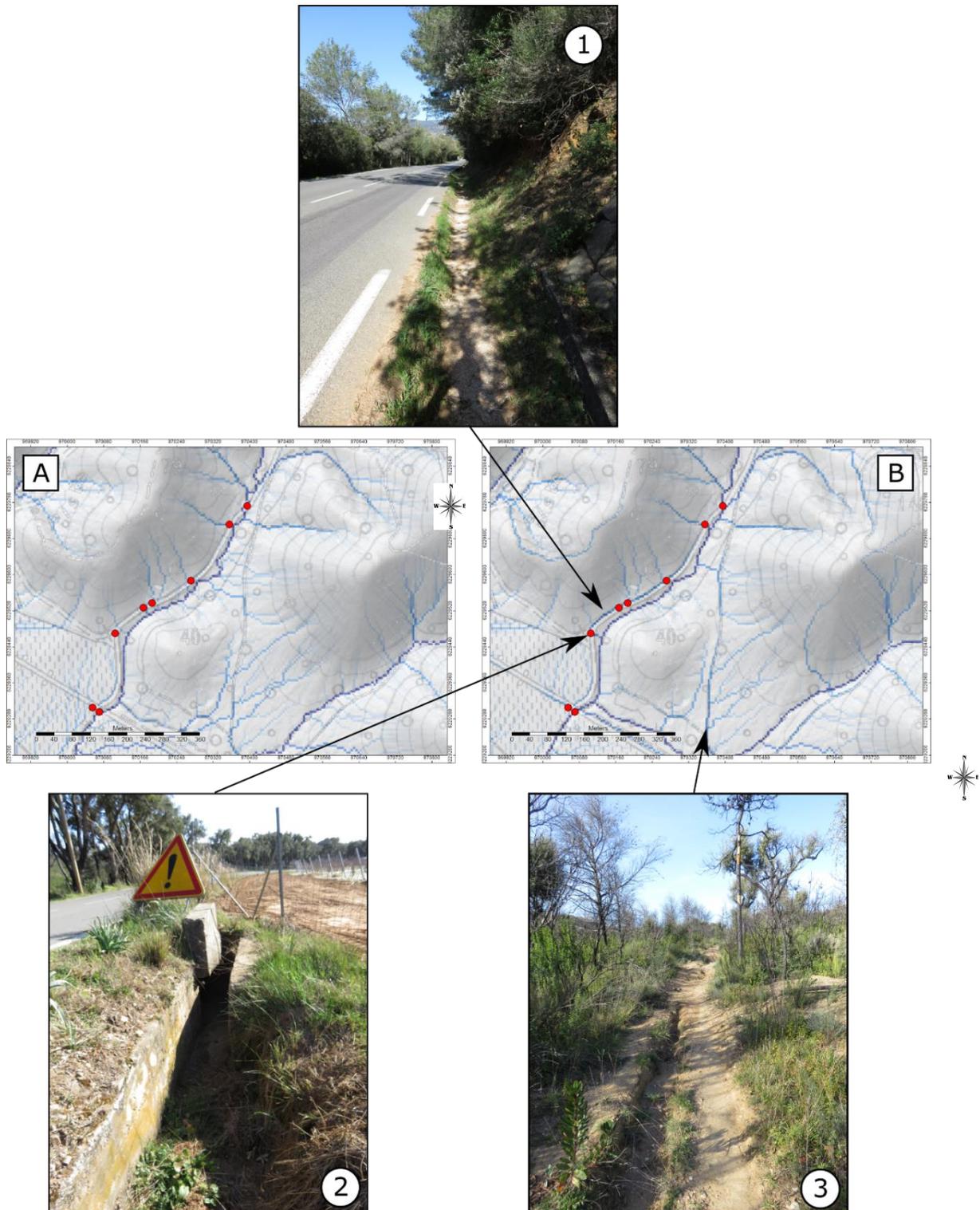


Illustration 27 : Illustration de l'inclusion des levés de terrain sur l'écoulement simulé. La zone est centrée sur la D42A au niveau de la redescente vers le Sud-Ouest depuis le col Griotte, sur une zone représentative des difficultés du terrain d'étude. A) Montre un écoulement sur le MNT initial (plus les lignes bleues sont foncées, plus le volume écoulé est important) et B) celui sur le MNT modifié suite aux relevés de terrain. Les points rouges signalent la présence d'ouvrages hydrauliques.

4. Modélisation du ruissellement et de l'érosion

4.1. PRÉALABLE : LIMITATIONS DE LA MODÉLISATION

Les modélisations n'étant que des représentations imparfaites de la réalité, chacune a des limitations relatives à la situation étudiée et ce, quel que soit le modèle employé. Avant de présenter les résultats des modélisations entreprises, il convient donc de noter les limitations de celles-ci et de les garder en tête lors de l'analyse des résultats.

En termes de données d'entrées, l'estimation des épaisseurs de sols sur le territoire a été effectuée sur la base d'observations ponctuelles et spatialisées selon un modèle disponible dans la littérature. Étant donné l'importance de cette donnée dans ce cas d'étude particulier, présentant des sols d'épaisseur nulle (roche affleurante) à forte (supérieure au mètre), et l'impact que cela peut avoir sur les résultats, il conviendrait dans une étude future de mieux étudier et quantifier cette épaisseur sur le territoire. La pertinence du modèle choisi, reflétant les tendances des épaisseurs observées sur le terrain, devrait également être mieux étudiée suite à augmentation du nombre d'observations.

Les données de pluie ont été reconstruites sur la base d'un hyétogramme schématique, sur lequel des quantités et durées ont été imposées. Les pluies de projets peuvent donc ne pas refléter entièrement les pluies qui sont observées sur le terrain. Par exemple, l'augmentation du cumul de pluie s'accompagne généralement d'une augmentation de la durée. Bien que le choix ait été fait de garder les choses fixes afin de ne pas générer trop de variabilité dans ces cas d'études, la durée des pluies utilisées pourrait donc être sous-estimées, résultant en des volumes et débit de pointes potentiellement surestimés par rapport à des épisodes pluvieux naturels.

Par ailleurs, les événements choisis, notamment l'évènement extrême, présentent des cumuls très importants. Rares sont les modèles de ruissellement ayant pu être évalués au regard d'évènements de plus de 200 millimètres, et encore plus rares sont ceux qui auraient été validés dans de telles conditions. Il est ainsi attendu que les résultats obtenus sous-estiment l'ampleur des phénomènes qui se seraient produits.

La plus grande limitation de cette étude, commune à de très nombreuses autres, est le manque de données disponibles pour calibrer le modèle, notamment face à l'ampleur des pluies de projet choisies. En effet, tout modèle mécaniste nécessite une calibration afin de renseigner les paramètres qui lui sont propres⁴. En l'absence de cette phase de calibration, il faut donc retenir les chiffres fournis lors de cette étude comme des ordres de grandeurs qu'il conviendrait de raffiner avec des mesures de débit et de matériaux en suspension, notamment pendant les événements pluvieux. Néanmoins, les données employées pour les simulations présentées dans ce travail sont issues de bases de données conséquentes et fournies. Par ailleurs, les comparaisons avec les données de la bibliographie montreront que les ordres de grandeurs obtenus sont pertinents relativement à ceux obtenus aux alentours de la région d'étude. Il est donc attendu que les simulations fournissent des résultats réalistes. L'étude relative d'un scénario par rapport à un autre (par exemple simulation avant et après incendie) permet par ailleurs de s'affranchir en partie de cette limitation, puisque dans ce cas c'est l'évolution relative qui est quantifiée.

⁴ Les modèles non-mécanistes se basent par ailleurs souvent sur des jeux de données, lesquels n'incluent également que très occasionnellement des événements extrêmes, et par définition pas en quantité suffisante pour permettre des relations statistiques solides.

Le modèle employé lors de cette étude a initialement été conçu afin d’analyser le ruissellement et l’érosion en conditions non-incendiées. Dans le cadre de ce projet, le modèle a donc dû être adapté. La méthodologie employée est présentée ci-dessous.

4.2. MÉTHODOLOGIE CHOISIE ET ADAPTATION

Afin de renseigner les caractéristiques des sols, nous utilisons l’occupation des sols telle que renseignée dans la section 3.4, mais également les cartes d’état de la végétation suite au feu, telles que décrites dans la section 3.6. En effet, en fonction de leurs intensités, les incendies détruisent tout ou partie de la matière organique des sols tout en provoquant une altération des propriétés physico-chimiques des sols. Le sol mis à nu est plus sensible à l’érosion, et favorise le détachement et le dépôt de nouvelles particules fines qui vont d’autant plus limiter la capacité d’infiltration du sol. La littérature s’accorde généralement à dire qu’un incendie augmente la sensibilité des sols au ruissellement et à l’érosion (Shakesby, 2011). En revanche, si les feux de forêts sont des phénomènes fréquents et leurs impacts assez bien cernés, les mesures des caractéristiques physiques des sols après incendie, utilisables en entrée de modèle, restent relativement limitées.

Dans le cadre de cette étude, il a été choisi de se baser sur un développement effectué par le Département de l’Agriculture des États-Unis (USDA), et particulièrement celle développée par le Soil Conservation Service (SCS), afin de décrire les propriétés des sols en fonction de leur occupation (e.g., forêts, vignes). Cette méthodologie renseigne par ailleurs ces propriétés en fonction de leur état (i.e. intact, brûlé de manière sévère ou intermédiaire – Soulis, 2018). Il s’agit de la méthode dite du SCS runoff Curve Number (CN). La méthodologie qui en découle associe à des occupations des sols et conditions spécifiques des réponses pluie-débit (Illustration 28) basées sur des jeux de données de références.

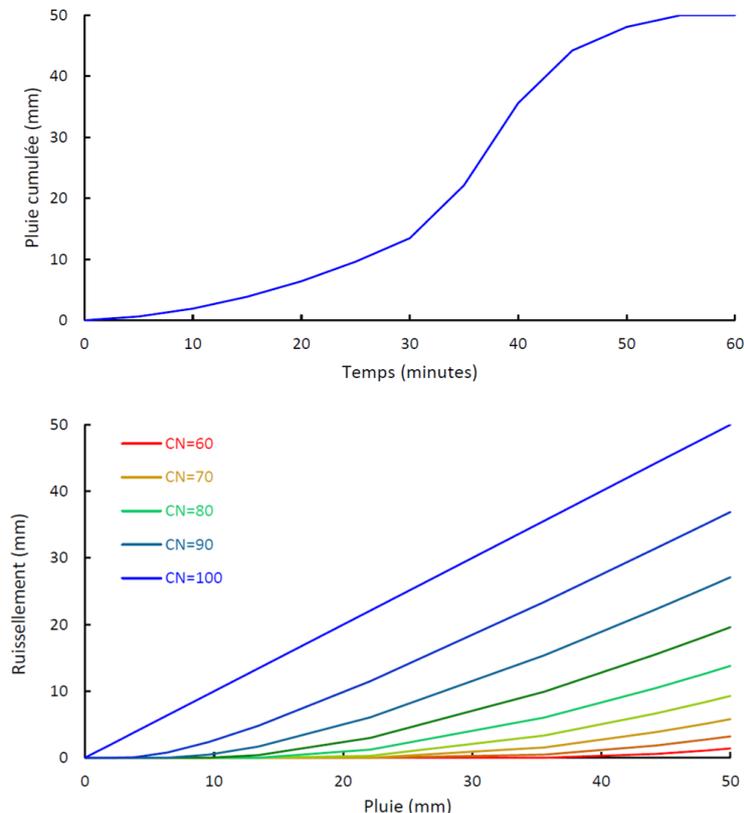


Illustration 28 : Illustration pour a) l’évènement décennal de b) la réponse pluie-ruissellement de différentes conditions de sols selon la méthodologie choisie.

Bien que cette méthode ait été initialement développée dans un objectif de prédiction du ruissellement, nous nous concentrons ici sur la paramétrisation poussée des caractéristiques des sols qu'elle propose afin d'alimenter le modèle Watersed. En effet, cette méthode dispose d'une base de données initiale importante, qui est de plus régulièrement améliorée puisque des publications scientifiques sont aujourd'hui toujours effectuées afin de renforcer ces données. En revanche il s'agit d'une méthodologie d'évaluation d'hydrogramme en une dimension, qui ne permet donc pas de bien tenir compte des hétérogénéités du territoire, et notamment des variations locales des propriétés de surface des sols qui peuvent être très importantes suite à un incendie.

En d'autres termes, la méthode des Curve number est utilisée comme paramétrisation sous-maille pour le modèle WaterSed : elle fournit pour chaque maille le ruissellement et le transfert de matières, que le modèle se charge de propager dans le paysage. Cette méthodologie a montré sa capacité à reproduire correctement des mesures dans des contextes où peu de données sont également disponibles (Colas *et al.* 2017 ; Vignerot *et al.*, 2018).

4.3. PARAMÉTRISATION DU MODÈLE

Une procédure classique en modélisation consiste dans un premier temps à calibrer les données en comparant les résultats à des mesures de terrain. Ces mesures sont variées mais typiquement des chroniques de débit et de concentration sont utilisées (e.g. Cea *et al.*, 2016). Cette évaluation se fait en comparant dans un premier temps les résultats hydrologiques, puis dans un second temps les résultats concernant l'érosion des sols et le transport de particules. Puis le modèle est alors considéré comme suffisamment bien paramétré pour être utilisé sur des scénarios d'occupation des sols ou de pluie.

Cependant, dans le cas du présent projet aucune mesure n'était disponible. L'évaluation des résultats s'est donc faite selon deux variables : le coefficient de ruissellement par type d'occupation du sol pour la partie hydrologique du modèle, et les exports de particules pour la partie érosion et transport de sédiments. Deux sources de données ont été utilisées : celles fournies par la base de données du SCS, qui fournit des gammes de coefficients de ruissellement par type d'occupation des sols. Nous nous sommes donc assurés que les gammes de coefficients de ruissellements étaient bien dans les gammes enregistrées par cette base de données. Par ailleurs, des valeurs mesurées sur le terrain ont été collectées dans la littérature scientifique, que ce soit en terme de ruissellement comme de taux d'érosion. Les données du SCS nous ont ainsi amenés à calibrer le modèle pour obtenir des coefficients de ruissellement compris entre 0 %-3 %, 8 % à 12 % et 15 % à 20 %, respectivement pour le cas de forêts intactes, touchées par un incendie d'intensité modérée et forte. Par ailleurs, des valeurs obtenues sur un bassin versant proche du lieu d'étude, le bassin de Réal Collobrier (Lavabre *et al.*, 1997), ont été utilisées. Des débits de pointe entre $2.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $4.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ont été enregistrés à l'exutoire d'un bassin de 1.5 km^2 . Ces valeurs permettent une calibration sur une variable clé de l'hydrogramme, en plus de fournir des données à une échelle supérieure à celle des coefficients de ruissellements locaux.

Les valeurs de taux d'érosions trouvées dans la littérature sont extrêmement variées car elles dépendent de nombreux facteurs tels que l'intensité de la pluie, la pente locale, la nature du sol, le temps depuis l'incendie, l'échelle de mesure (Vieira *et al.*, 2015) ... Vieira *et al.* (2016) reportent par exemple des taux d'érosion allant de 0.1 à $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. De ce fait, les valeurs proposées par Martin *et al.* (1997) ont là aussi été retenues, d'autant plus qu'elles ont été obtenues au sein de bassin versant de géologie semblable à l'étude, à savoir des sols développés sur phyllades. Les taux d'érosions reportés sont de l'ordre de 0.3 à $16 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivement après et avant reprise de la végétation. Il est cependant important de noter que lors de cette étude, les auteurs soulignent « une extension limitée des affleurements rocheux », signe d'un sol développé. À l'inverse, et comme présenté lors de l'analyse des épaisseurs de sol, (section 3.3) il a été noté lors de la mission de terrain qu'en plusieurs points

du bassin versant la roche était affleurante, soulignant une disponibilité en matériaux localement limitée.

4.4. RAPPEL ET SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS DE MODÉLISATION

Les modélisations qui seront effectuées viseront à analyser les effets de l'incendie face à deux périodes de retour de pluie, pour des conditions initiales respectivement humides et sèches, plus un évènement de pluie exceptionnel. Chacun de ces scénarios de pluie sera appliqué à trois scénarios d'occupation des sols : avant incendie, juste après incendie et pour la période actuelle.

Soit un total de 15 simulations (Illustration 29), pour lesquelles les résultats suivants seront conservés : coefficients de ruissellement, débit de pointe et volume ruisselé pour l'eau, et taux d'érosion spécifique et flux de matériaux pour l'érosion et le transfert de matériaux.

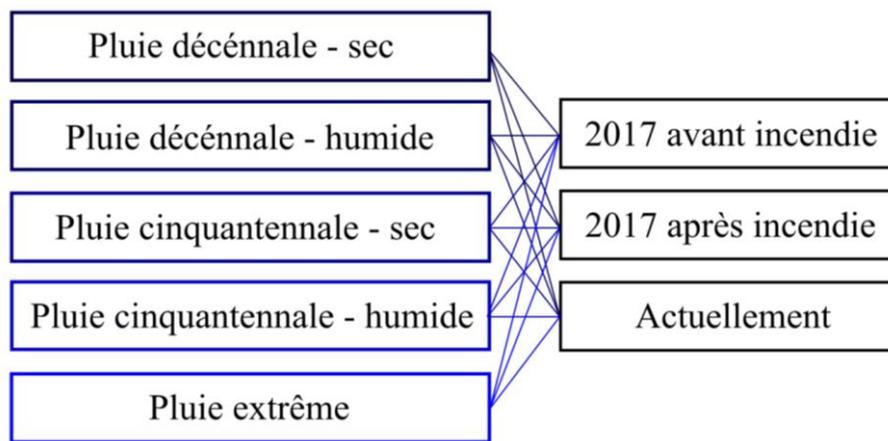


Illustration 29 : Résumé des scénarios de modélisations.

4.5. RÉSULTATS DE MODÉLISATION ET INTERPRÉTATION

L'évaluation des résultats de modélisation est faite en plusieurs temps. Les scénarios de pluie seront d'abord analysés sur terrain sec pour une pluie décennale. Il s'agit ici de se placer dans des situations proches de la bibliographie afin de valider les ordres de grandeurs obtenus par le modèle. L'occupation du sol avant incendie sera utilisée dans un premier temps afin d'établir les scénarios de référence. Puis les différences relatives avec les différents scénarios de pluie et d'occupation du sol seront étudiées.

Pour chaque paragraphe ci-dessous, une explication détaillée sera donnée, et les résultats principaux synthétisés sans détails techniques dans un encart en fin de paragraphe.

4.5.1. Pluie décennale avant incendie sur un terrain sec

L'analyse du sur-aléa lié aux incendie implique nécessairement d'établir une carte de référence avant incendie. L'occupation des sols pré-incendie (section 3.4) a donc été utilisée. Les cartographies obtenues en sortie de modélisation (Illustration 30) montrent que, sur ce territoire, un évènement décennal sur une végétation bien développée n'aurait qu'un impact limité. Les forts coefficients de ruissellement se concentrent en effet sur les zones urbanisées, du fait de l'imperméabilisation des sols. Néanmoins, il conviendrait de s'assurer que les réseaux d'eaux pluviales des villes sont capables de contenir l'eau ruisselante se produisant sur site pour des évènements décennaux.

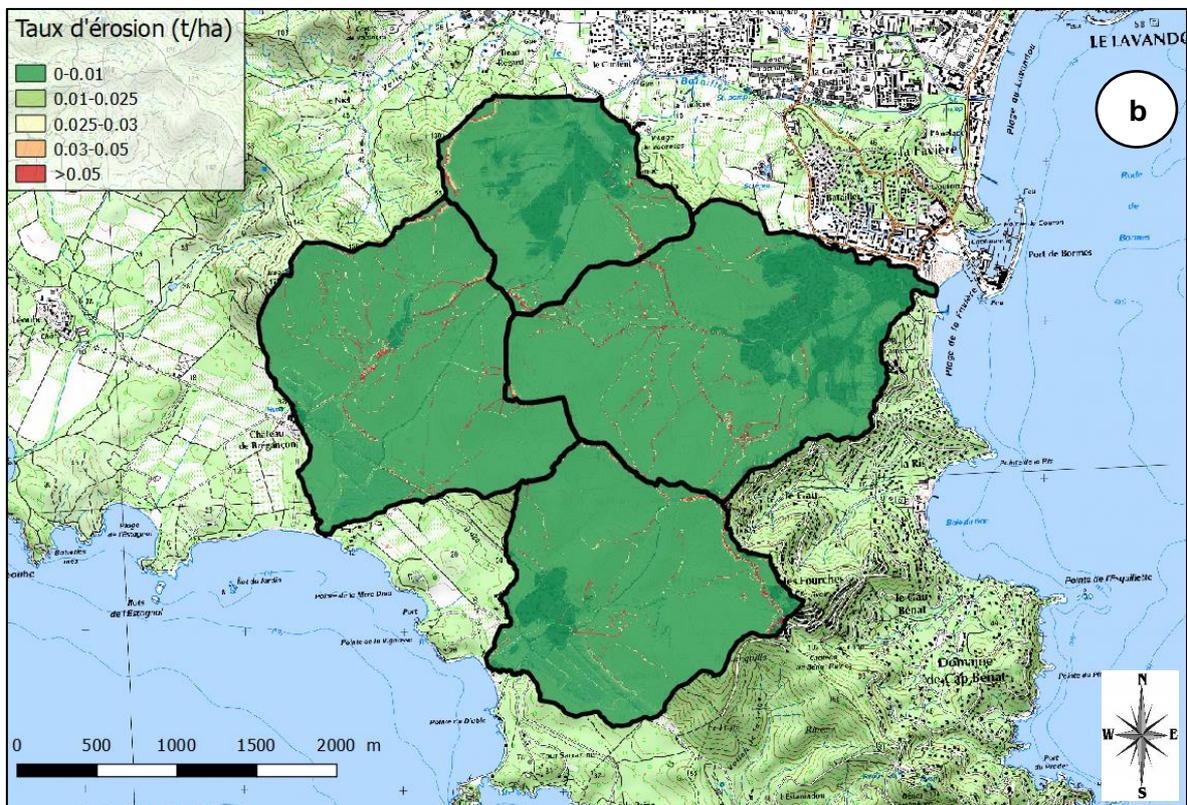
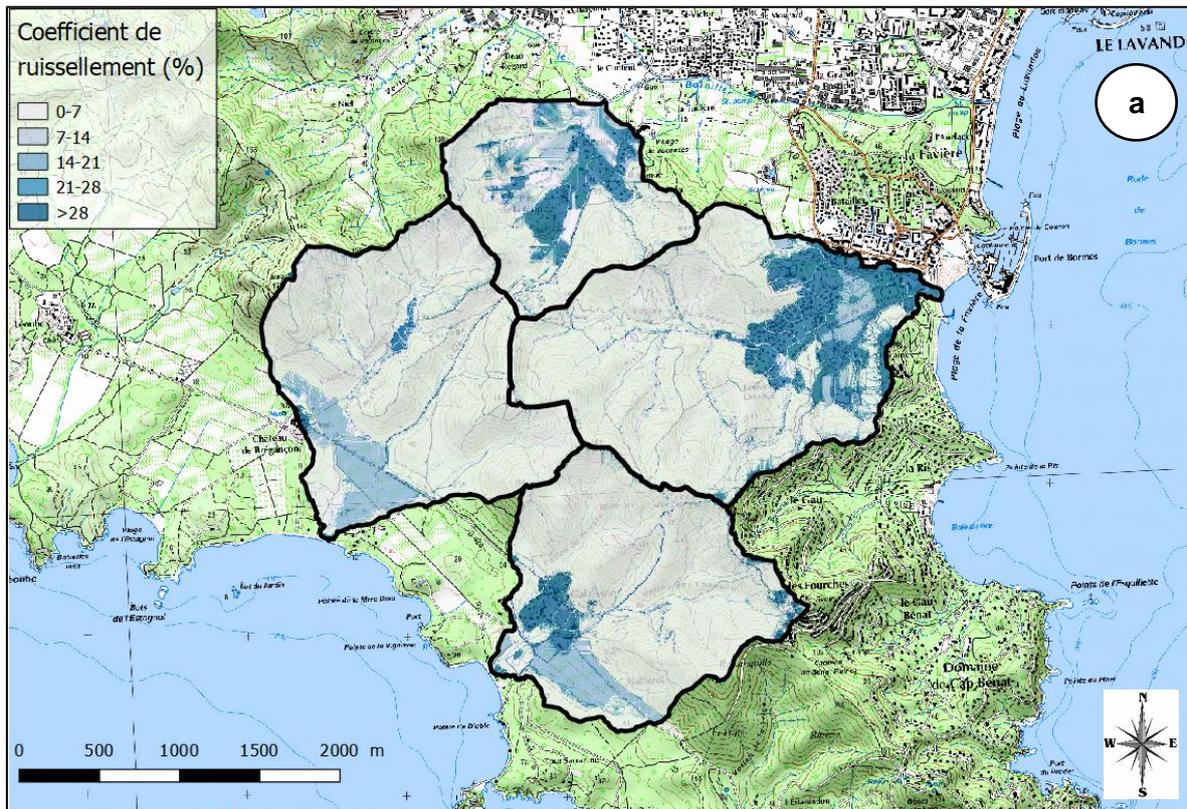


Illustration 30 : Cartographie a) des coefficients de ruissellement et b) des taux d'érosion locaux, ici pour la configuration 2017 avant incendie et pour l'évènement décennal sur terrain sec, sur fond de carte Scan 25 IGN.

Seules les zones présentant une épaisseur de sol faible, comme les chemins, dont la dégradation constatée sur le terrain génère un ruissellement significatif, permet un transport de matériaux vers l'aval. L'illustration 31 présente les résultats correspondant.

Variable	Léoube	Patelin	Brégançon	Favière
Bassin versant				
Volume ruisselé (m³)	3 328	5 255	3 037	10 382
Volume ruisselé (mm)	2.4	1.7	1.4	4.06
Débit de pointe (m³.s⁻¹)	0.2	0.3	1.4	5.7
Masse exportée (kg)	567	95	321	553

Illustration 31 : Synthèse des volumes liquides et solides exportés à l'exutoire des bassins versants.

Étant donné le potentiel ruisselant des différents bassins versants, les forts volumes d'eau modélisés pour le bassin versant de Favière reflètent la forte proportion de terrains urbanisés, fortement générateurs de ruissellement.

À retenir

Les modélisations avant incendie montrent, au niveau hydrologique, une contribution venant principalement des zones urbanisées dont le revêtement augmente l'imperméabilisation., ainsi que des routes et chemins en terre. En effet, du fait de leur faible épaisseur de sol, ces derniers se saturent facilement et favorisent le ruissellement. Les taux d'érosions sont globalement faibles, ce qui est caractéristique des zones avec forte végétation. Les chemins contribuent au bilan sédimentaire par endroit, lorsque les épaisseurs de sol le permettent, avec des taux d'érosion globalement peu élevés.

4.5.2. Pluie décennale après incendie sur terrain sec

Faute de données mesurées, les modélisations ont été effectuées en renseignant des paramètres qui permettent de simuler des valeurs proches de celles obtenues dans la bibliographie. Ainsi, les coefficients de ruissellement locaux ont été comparés aux valeurs fournies par les données de l'USDA, et les valeurs de taux d'érosion à celle fournies dans la bibliographie (Illustration 32).

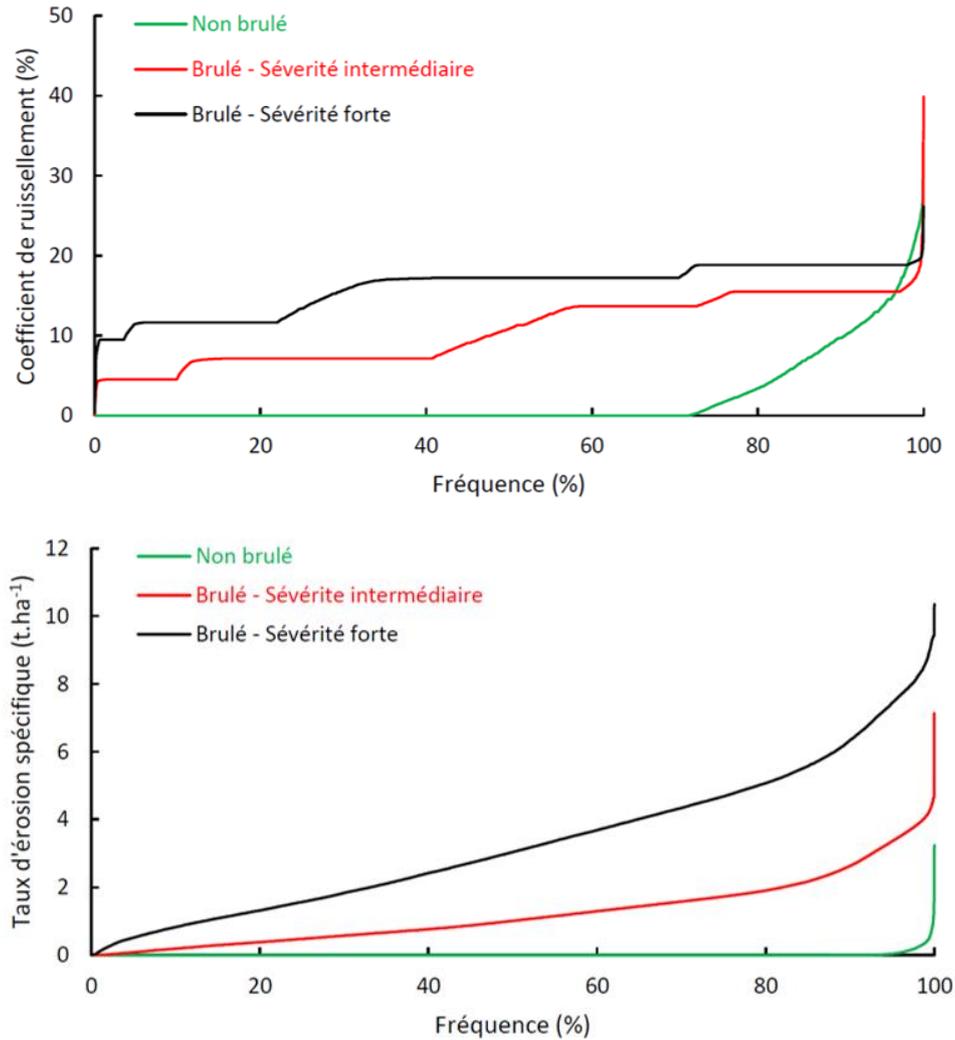


Illustration 32 : Synthèse des données simulées sur le bassin versant, pour les données classées sous la nomenclature forêt.

Les valeurs de coefficient de ruissellement sont fournies en fonction d'une pluie donnée ; la comparaison aux données simulées est donc directe. En revanche, bien que la bibliographie sur les taux d'érosion utilisée fasse état d'année pluvieuse pendant les années de suivi (avec des années aux alentours de 900 à 1000 mm), il n'est pas fait état d'évènements de pluies exceptionnelles. Les comparaisons avec les modélisations sont donc effectuées dans notre cas avec l'évènement décennal.

Les simulations donnent des résultats relatifs cohérents : les coefficients de ruissellements augmentent avec l'intensité de l'incendie. S'agissant de valeurs locales, elles sont comparées avec les données de l'USDA, qui présente des valeurs comprises entre 5 % et 25 %. Les valeurs modélisées ici sont comprises entre 4 % et 23 %. De la même manière, les taux d'érosions locaux sont compris entre 0.1 et 9 t.ha⁻¹, ce qui est en accord avec les valeurs proposées dans la littérature, et notamment dans la zone voisine de Réal Collobrier.

Les cartographies résultantes (Illustration 33) indiquent les zones de production majoritaires des flux liquides (i.e. ruissellement) et solides (i.e. taux d'érosion).

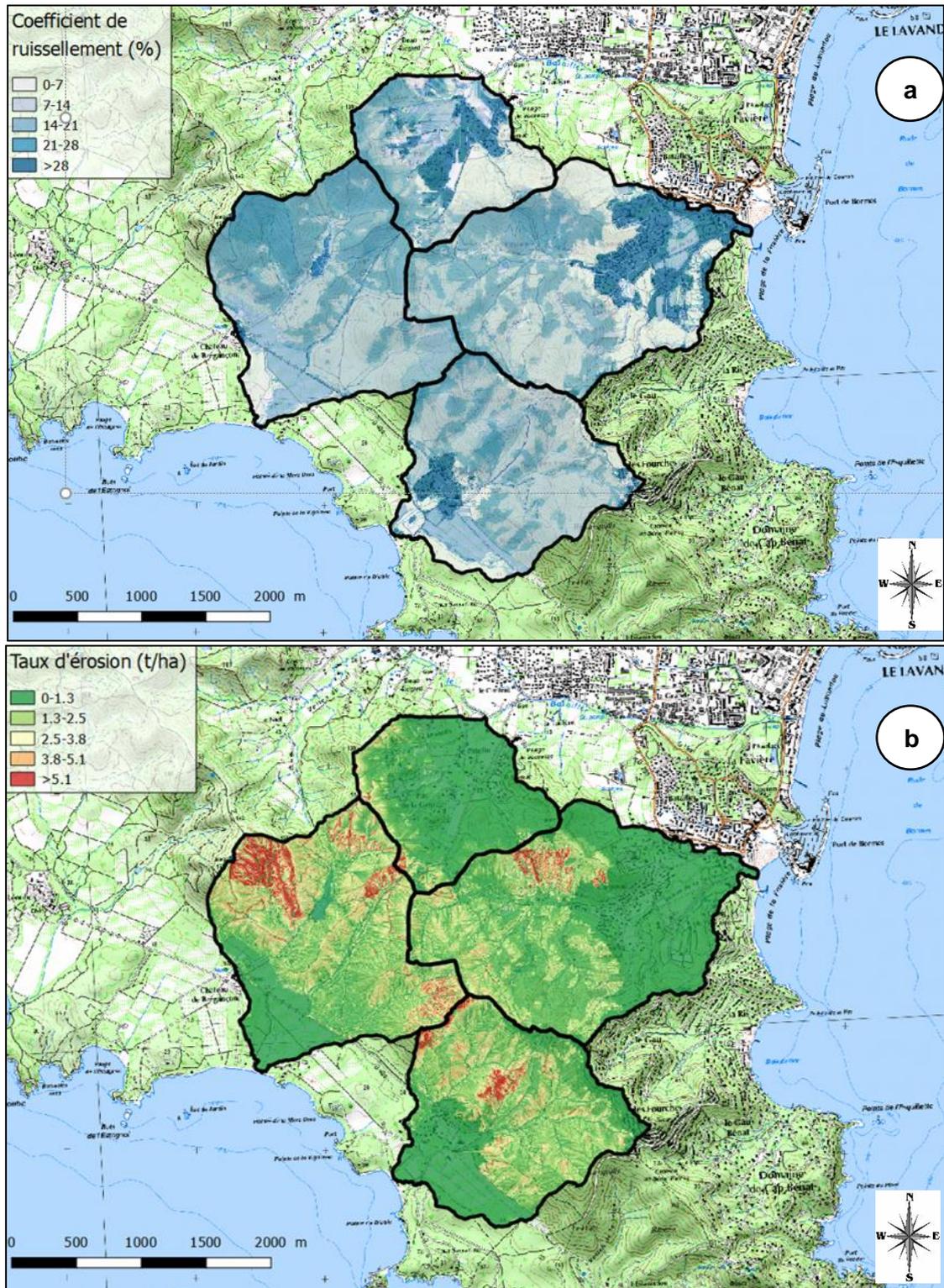


Illustration 33 : Cartographie a) des coefficients de ruissellement et b) des taux d'érosion locaux, ici pour la configuration 2017 après incendie et pour l'évènement décennal sur terrain sec sur fond de carte Scan 25 IGN.

Si les zones de production majoritaires du ruissellement sont en premier lieu les zones urbaines, du fait de l'imperméabilisation des surfaces liées aux habitations et au revêtement des routes, la modélisation révèle que la totalité de la zone incendiée contribue à la genèse du ruissellement dans des proportions non-négligeables, situation a priori peu probable sans incendie car la zone étant globalement recouverte de végétation, les coefficients de

ruissellements devraient y être faibles, de l'ordre de quelques pourcent au maximum sauf dans le cas d'un évènement particulièrement saturant. Si le bassin versant de Patelin peut sembler peu affecté, les zones les plus en amont ont été affectées. Or il s'agit des zones présentant les plus fortes pentes, donc une connexion assez forte avec les zones en aval. Il en résulte une augmentation potentielle des flux hydrologiques et érosifs sur les chemins de transfert en aval.

On note en revanche l'impact particulièrement important de l'incendie sur les taux d'érosions locaux. En effet, la majorité de la contribution au bilan érosif du bassin versant provient de la zone incendiée. Par ailleurs, les zones identifiées comme incendiées avec la plus forte sévérité se distinguent nettement comme contributeurs importants en terme de taux d'érosions locaux. Il s'agit donc de zones sources privilégiées de matériaux, dont la gestion devra être prioritaire et à déjà en partie été traitée sur le terrain par les acteurs locaux (e.g. implémentation de fascines dans le vallon des Conques). En effet, aujourd'hui encore ces territoires présentent une reprise très limitée de la végétation et sont donc encore susceptibles de se dégrader davantage sous l'effet de nouvelles pluies et donc de provoquer de nouveaux dommages sur site et en aval.

Ce résultat est lié à l'évolution de l'occupation des sols sous l'effet de l'incendie. En effet, sous forêt l'énergie cinétique des gouttes de pluie est brisée par la canopée et la litière. Par ailleurs, la destruction des débris organiques présents à la surface du sol facilite la circulation de l'eau, accélérant sa vitesse de propagation et limitant son infiltration, ce qui augmente la puissance spécifique de l'écoulement et favorise l'incision de la couche de sol. De plus, la destruction de la matière organique de l'horizon de surface du sol réduit sa cohésion facilitant d'autant plus l'érosion des terrains incendiés. Par ailleurs, la zone incendiée correspond également à celle présentant les reliefs les plus marqués, avec les pentes les plus fortes, qui facilitent à la fois le développement de la vitesse de l'écoulement et limite les possibilités de dépôt de particules.

À retenir

L'incendie a affecté 65 % du territoire avec une intensité variable mais globalement forte. Il a mis les surfaces à nu, brulé la litière du sol, détruit le couvert végétal et augmenté l'hydrophobicité du sol. En conséquence, le territoire a globalement vu la sensibilité aux aléas ruissellement et érosion augmenter. La quasi-totalité de certains sous-bassins versants sont devenus des zones contributrices de ruissellement et d'érosion. Les valeurs modélisées sont cohérentes avec celles reportées dans la littérature.

4.5.3. Effet de la période de retour de la pluie

La période de retour des épisodes de pluie va influencer le ruissellement par les quantités qui vont ruisseler, mais également par une mobilisation progressive de nouvelles zones contributrices au sein des bassins versants. L'illustration 34 montre l'évolution du ruissellement avec l'augmentation de la quantité d'eau précipitée, à titre illustratif au sein d'un zoom sur le bassin versant de Brégançon.

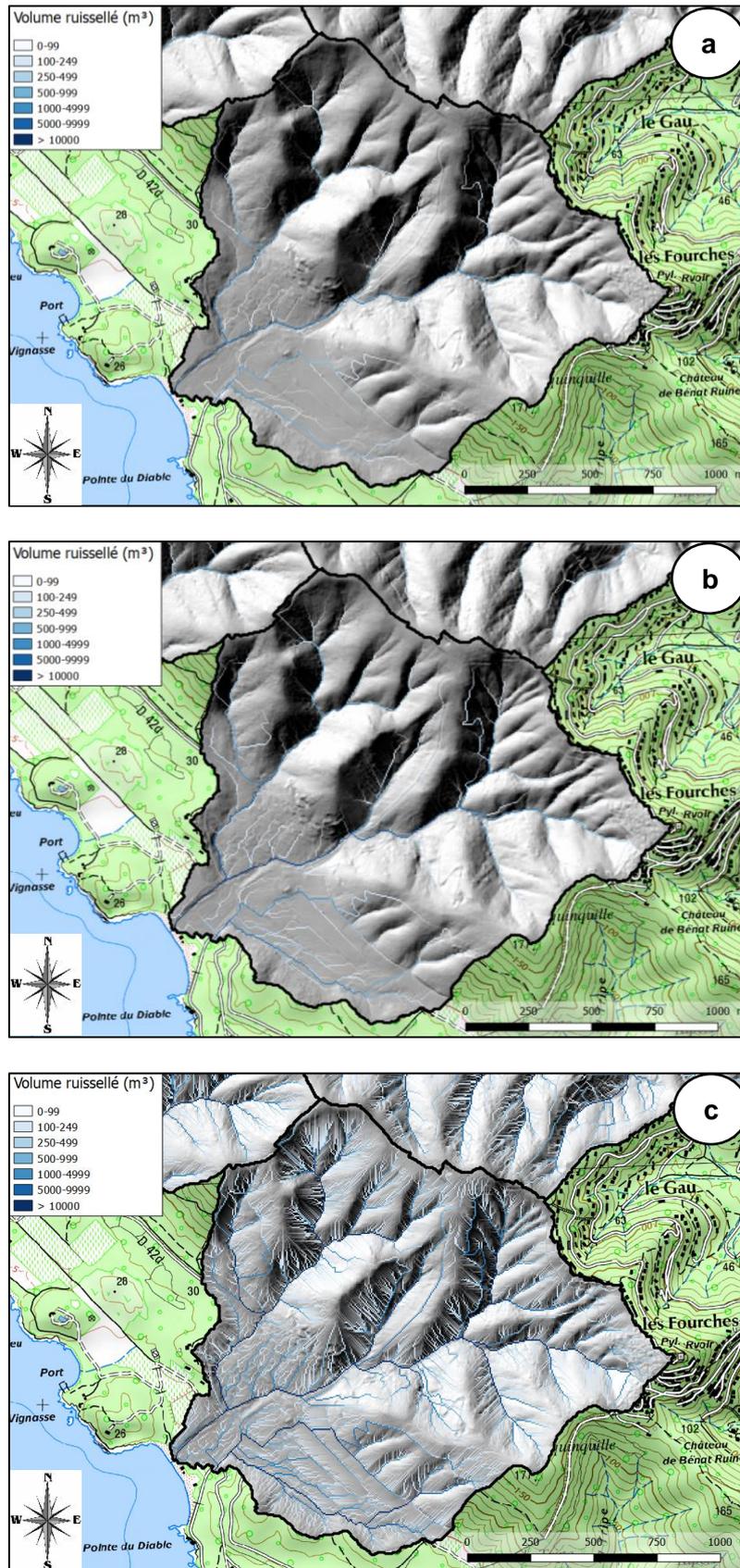


Illustration 34 : Ruissellement simulé sur configuration de sol brûlé en 2017, ici zoomé sur le bassin versant de Brégançon, pour les événements a) décennal b) cinquantennal et c) extrême. L'échelle de couleur est identique sur les trois figures. Résultat présenté sur MNT ombragé et fond de carte IGN Scan 25.

Le ruissellement est d'abord généré sur les zones pour lesquelles les épaisseurs de sols sont faibles, typiquement les chemins, et les zones de fortes pentes. Ce ruissellement se concentre de l'amont vers l'aval pour se concentrer dans le réseau hydrographique. L'augmentation de la période de retour de la pluie augmente l'intensité du ruissellement, à la fois en augmentant les quantités ruisselées localement mais également en mobilisant de plus en plus de surface en amont. Le cas extrême l'illustre très bien, avec un ruissellement généralisé sur la totalité du bassin versant, à la fois dans les zones de fortes comme de faibles pentes, sur les zones de fortes comme de faibles épaisseurs de sol.

À retenir

L'augmentation de la période de retour, et donc du cumul de pluie, va avoir tendance à augmenter non seulement la quantité d'eau localement propagée par le ruissellement, mais également à augmenter la surface ruisselante du bassin versant. Pour l'évènement extrême, la quasi-totalité de la surface du bassin versant peut être considérée comme produisant du ruissellement.

4.5.4. Quantification des résultats à l'échelle globale

Étant donné le nombre important de modélisations demandées au cours de cette étude, nous avons dans un premier temps essayé de hiérarchiser les facteurs influençant le plus les résultats, en terme de ruissellement et de transport de matériaux. Ici, nous extrayons les résultats en sortie de chacun des quatre bassins versants afin d'être le plus intégratif et représentatif possible. Nous nous sommes dans un premier temps intéressés aux variations induites par les états initiaux des simulations, autrement dit la différence entre les modélisations avec état initial sec et état initial humide (Illustration 35).

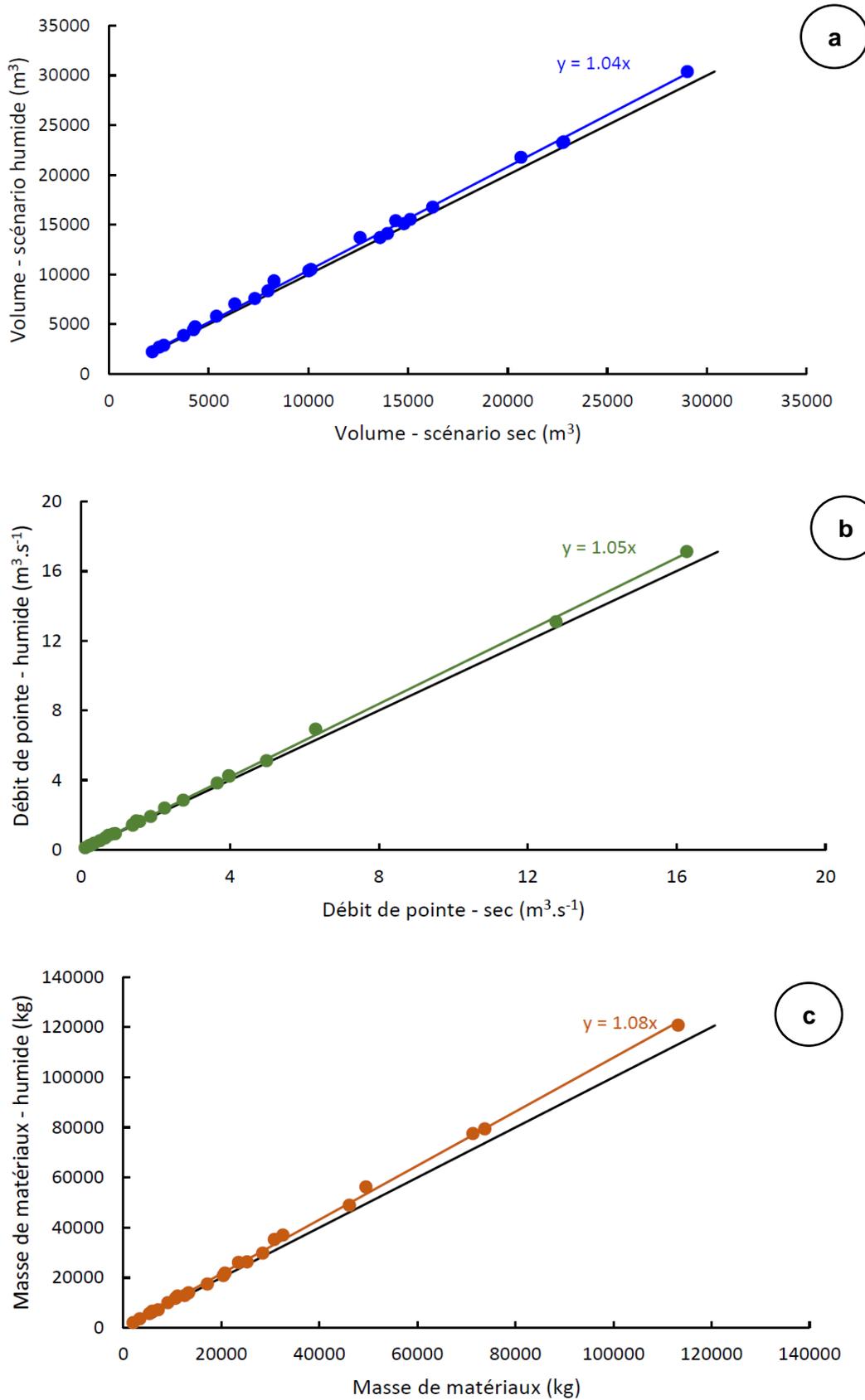


Illustration 35 : Représentation a) du volume d'eau b) du débit de pointe et c) de la masse de matériaux transférés pour tous les scénarios (sauf extrêmes) et toutes les localisations. La ligne noire sur chacun de ces graphiques représente la première bissectrice.

Globalement, les résultats montrent une faible divergence. Bien entendu, les états initiaux humides présentent des volumes plus importants que les états initiaux secs. Cependant, l'augmentation se fait de manière faible : en moyenne, les volumes divergent de 4 %. Ce résultat est également constaté pour le débit de pointe (5 %), et pour les masses transportées (8 %) Ceci s'explique par la combinaison de deux facteurs. Premièrement, l'importance des pluies de projet (au minimum 50 millimètres de pluie en une heure), qui résultent donc en une prédominance du ruissellement hortonien. Par ailleurs, étant donné les volumes précipités et stockables dans le sol sur ce territoire, la part du ruissellement se produisant par saturation de la colonne de sol va être peu influencée par le stock initial d'eau ; la quantité infiltrée au cours de l'évènement viendra dépasser l'effet du stock initial. Ainsi, les différences entre scénarios en conditions initiales humides et sèches ne présentent que peu de différences et ne seront pas analysées en détail par la suite. Les graphiques présentés seront ceux sur sol sec, supposés plus représentatifs des évènements pluvieux se produisant durant des périodes pendant lesquelles les incendies sont plus probables.

À retenir

Étant donnée la configuration du territoire et les pluies de projet sélectionnées dans le cadre de ce travail, l'état hydrique du sol ne contribue que très peu à modifier les résultats des simulations.

En revanche, l'analyse de l'effet des incendies montre des impacts bien plus importants, que ce soit sur le volume ruisselé, le débit de pointe ou les masses de matériaux transportés (Illustration 36).

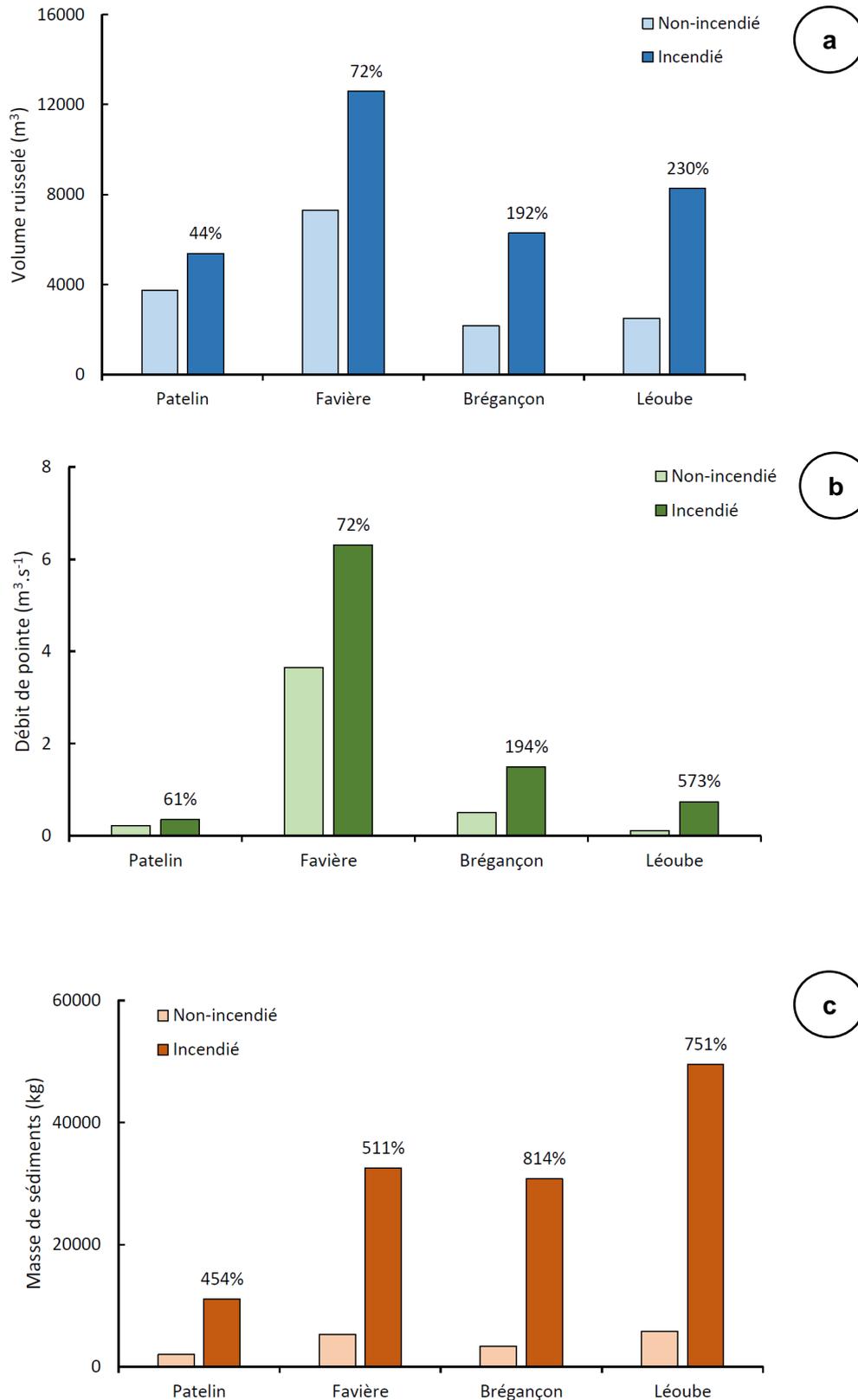


Illustration 36 : a) Volume ruisselé b) débit de pointe et c) masse de sédiments transportés pour les quatre sous-bassins versants de l'étude. Résultat ici présenté pour l'année 2017 avant (figuré clair) et après (figuré foncé) incendie, pour la période de retour 10 ans. Le pourcentage d'augmentation attribuable à l'incendie est indiqué sous la forme de pourcentage au-dessus des barres.

En moyenne sur les bassins versants et les scénarios de pluie, le volume ruisselé, le débit de pointe et la masse de sédiments transportée sont augmentés de 86 %, 139 % et 532 %. L'augmentation des volumes et du débit de pointe est principalement due à la destruction de la matière organique du sol et à des effets de contraction thermiques. En plus de diminuer la capacité d'infiltration du sol, ces phénomènes vont générer des effets d'hydrophobicité (Shakesby *et al.*, 2011) qui vont contribuer à augmenter le ruissellement de manière généralisée sur le bassin versant. La destruction de la matière organique du sol contribue en outre à limiter sa cohésion. En parallèle de l'augmentation du ruissellement et donc de la capacité de transport de l'écoulement, les incendies augmentent donc l'érodibilité du sol. Par ailleurs, le couvert végétal le protégeant s'en retrouve très fortement réduit. Ainsi, l'érosion des sols va augmenter dans des proportions importantes. En moyenne sur cette étude, elle est augmentée pour la période de retour décennale d'un facteur 6.6, et d'un facteur 4 pour la période de retour cinquantennale.

Les effets de l'incendie diffèrent en fonction des bassins versants. Ainsi le bassin versant de Léoube est le plus fortement impacté, à la fois du fait de l'incendie quasi-généralisé ayant touché la zone, des fortes pentes mais également car il concentre le plus de zones incendiées par forte intensité. Ce bassin versant présente donc logiquement la plus forte sensibilité à l'effet des incendies. Inversement, le bassin versant du Patelin ne présente de zones fortement incendiées qu'en périphérie, une étendue des zones impactées de manière intermédiaire restreinte, mais également des zones préservées de l'incendie et des zones de faibles pentes en aval, toutes deux favorable à l'infiltration et au dépôt.

À retenir

L'incendie affecte fortement la réponse ruisselante et érosive de tous les bassins versants. De manière générale, et par effet de cascade, l'ordre des variations relatives est, quel que soit le sous bassin versant considéré : ruissellement < débit de pointe < transfert de matériaux.

Il est intéressant de noter l'effet de la période de retour de la pluie. Évidemment les volumes d'eaux, le débit de pointe et les masses transportées sont plus importantes à scénarios équivalents (en moyenne, respectivement 234 %, 411 % et 187 %) car les quantités précipitées sont plus importantes et précipitées sur une même période. Ainsi l'intensité de la pluie et donc le débit de pointe se retrouvent fortement augmentés. Il est en revanche très intéressant de décomposer ce résultat en fonction de l'état d'incendie du territoire (Illustration 37).

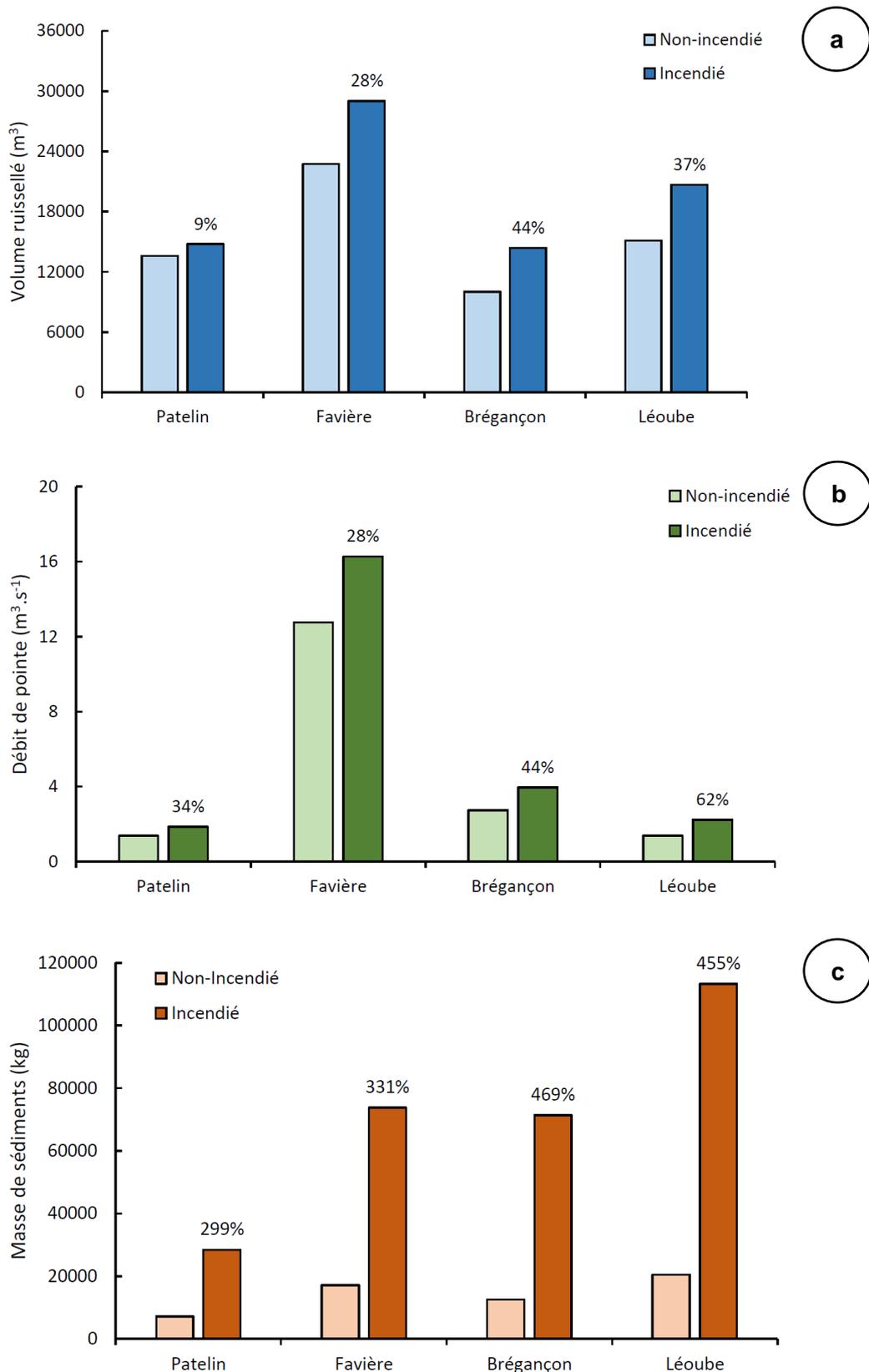


Illustration 37 : a) Volume ruisselé b) débit de pointe et c) masse de sédiments transportés pour les quatre sous-bassins versants de l'étude. Résultat ici présenté pour l'année 2017 avant (figuré clair) et après (figuré foncé) incendie, pour la période de retour 50 ans. Le pourcentage d'augmentation attribuable à l'incendie est indiqué sous la forme de pourcentage au-dessus des barres.

En effet, l'augmentation du ruissellement, de l'érosion et du transport de sédiments sont moins sensibles pour une pluie de période de retour plus importante. Ainsi, si l'on regarde les résultats sur le bassin versant de Favière, les variations du ruissellement et des masses transportées sont respectivement de 72 % et 511 % pour la période de retour 10 ans, alors qu'ils ne sont que de 28 % et 331 % pour la période de retour de 50 ans. Ce comportement avait déjà été modélisé dans le contexte de la Corse, pour des événements pluvieux décennaux et centennaux (Vignerot et Vandromme, 2018). Il s'explique par l'augmentation de l'importance relative de la variation de la pluie par rapport aux variations de l'état de surface des sols liés à l'incendie. En d'autres termes, face à l'augmentation de l'ampleur du cumul de pluie, les variations des caractéristiques du sol (capacités d'infiltration, érodibilité, etc.) sont moins sensibles. Ce résultat est intéressant d'un point de vue scientifique, mais présente également des implications pratiques. En cas de nouveaux incendies sur le territoire, tenter de gérer l'état des sols deviendra de moins en moins important au fur et à mesure de l'augmentation de la période de retour des événements pluvieux qui surviendront par la suite. Les solutions de types hydraulique douce (telles les fascines par exemple) seront par ailleurs plus pertinentes pour gérer les événements de pluie de cumul et d'intensité faible à modérer, et devront laisser place à des installations plus lourdes face aux événements plus importants.

À retenir

Si l'augmentation de la période de retour augmente les quantités d'eau et de matériaux ruisselés, elle induit une diminution des variations relatives liées à l'incendie.

Les simulations menées sur la configuration type 2019 permettent de quantifier les effets de la reprise de la végétation par rapport à la situation post-incendie (Illustration 38).

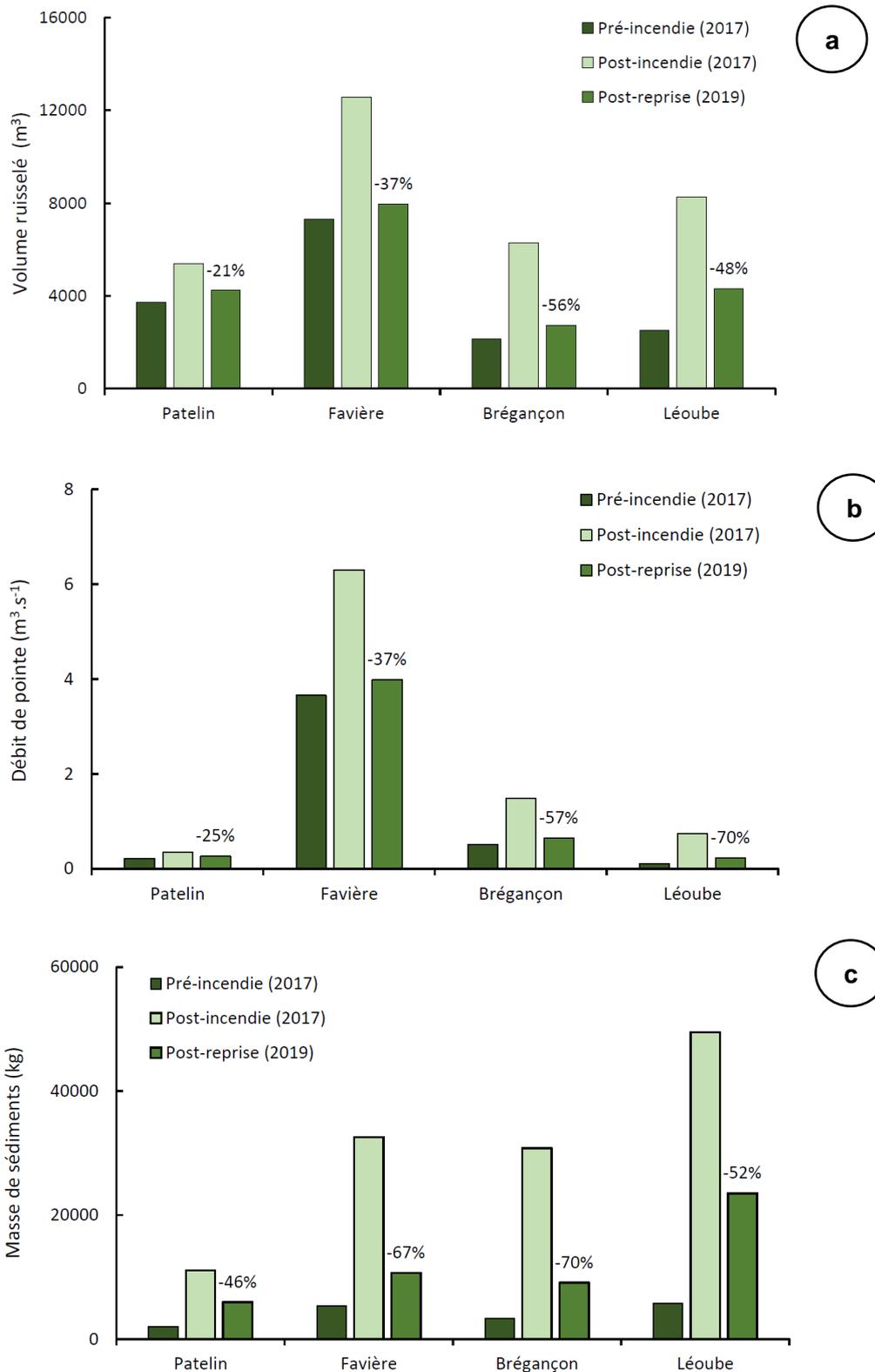


Illustration 38 : a) Volume ruisselé b) débit de pointe et c) masse de sédiments transportés pour les quatre sous-bassins versants de l'étude. Résultat ici présenté avant (figuré foncé) et après incendie (figuré clair), mais également sur une situation actuelle (2019, couleur moyenne), pour la période de retour 10 ans. Le pourcentage de réduction attribuable à la reprise de la végétation suite à l'incendie est indiqué sous la forme de pourcentage au-dessus des barres.

Les variations obtenues sont encore importantes par rapport à la situation pré-incendie. En accord avec les observations de terrain les modélisations montrent, en le quantifiant, que les bassins versants ne sont toujours pas revenus à un équilibre depuis l'incendie, malgré des reprises localement importantes de la végétation. Les bassins versants impactés de manière moins sévère par les incendies tendent néanmoins à un retour vers une situation moins dommageable, avec une réduction des masses transportées par rapport à la situation après incendie de l'ordre de -70 %. Cette réduction est imputable à un rétablissement de l'infiltration des sols par réimplantation de la végétation et le développement racinaire associé, mais également par le ralentissement du ruissellement qu'elle induit et la diminution de l'effet de la pluie sur les sols. En moyenne, la situation actuelle reste encore propice au risque érosion en des zones localisées (correspondant à celles où l'incendie a été qualifié comme le plus sévère), l'augmentation des masses transportées étant quantifiée à un facteur 2. Les volumes ruisselés sont eux, en moyenne proches de 30% supérieurs à la situation pré-incendie. On notera néanmoins que ces moyennes sont impactées par le bassin de Léoube, dont les valeurs élevées tirent mécaniquement la moyenne vers le haut.

À retenir

Les modélisations permettent de montrer que le ruissellement, comme l'érosion, ont vu leur intensité respective diminuer suite à la reprise de la végétation. Cependant, deux ans après le feu, la situation n'est pas revenue à son état initial. Ceci est particulièrement vrai sur le sous-bassin versant de Léoube, qui avait vu une superficie importante de son bassin versant affecté par l'incendie avec une forte intensité.

4.6. POINTS SENSIBLES ET EFFETS GLOBAUX DES INCENDIES

Dans le cadre de ce travail, un inventaire des différents ouvrages et potentiels points noirs a été effectué sur la région (Illustration 26). Suite à des échanges avec les services techniques de la ville de Bormes-les-Mimosas se basant sur leur connaissance du territoire et leur retour d'expérience, de manière générale pendant les événements de pluie et particulièrement suite à l'incendie, seul un certain nombre d'entre eux ont été retenus (Illustration 39).

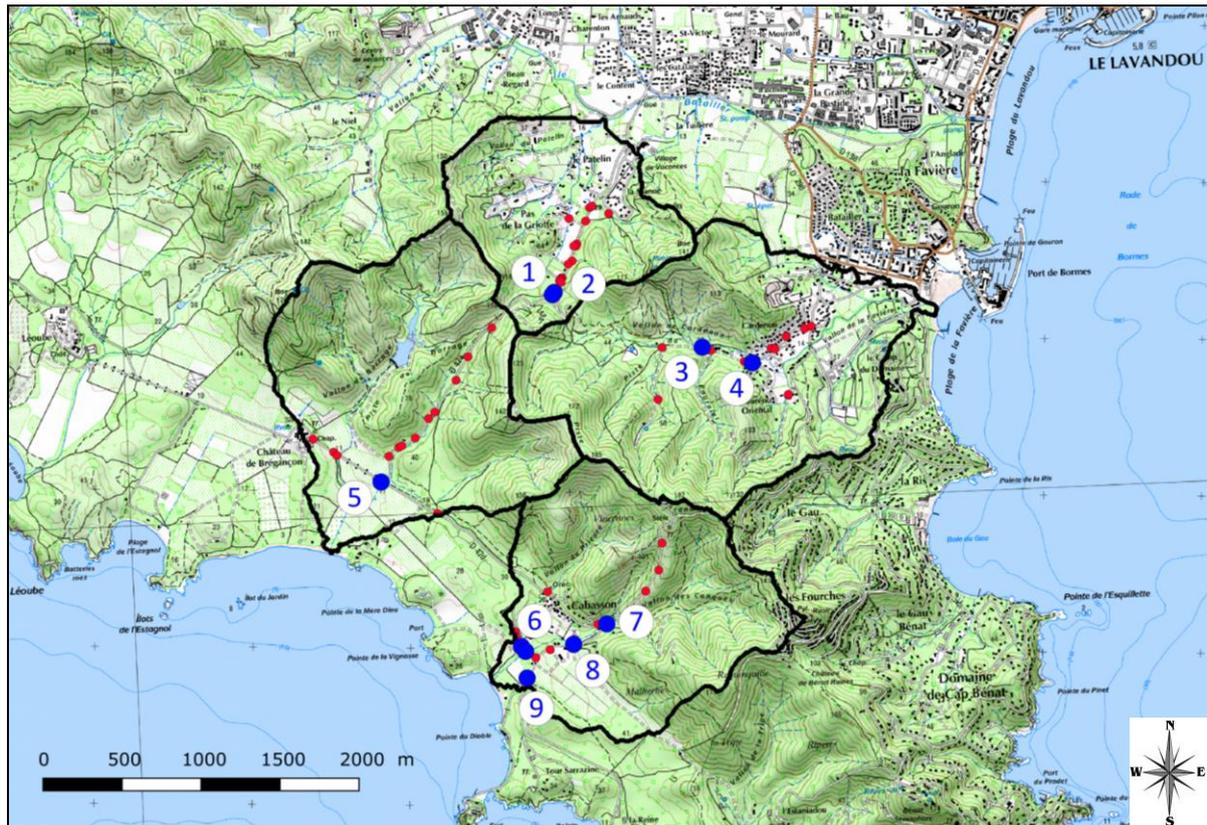


Illustration 39 : Localisation des ouvrages relevés sur le terrain (en rouge) et de ceux identifiés comme les plus importants par les services techniques de la ville de Bormes-les-Mimosas (en bleu, accompagné de leur identifiant numérique). Données présentées sur fond de carte Scan 25 IGN.

Un total de neuf zones particulièrement importantes a ainsi été identifié. Afin d'évaluer les effets de l'incendie sur le ruissellement et l'érosion, le rapport entre les résultats de modélisation sur terrain incendié et sur terrain non-incendié a été effectué (Illustration 40).

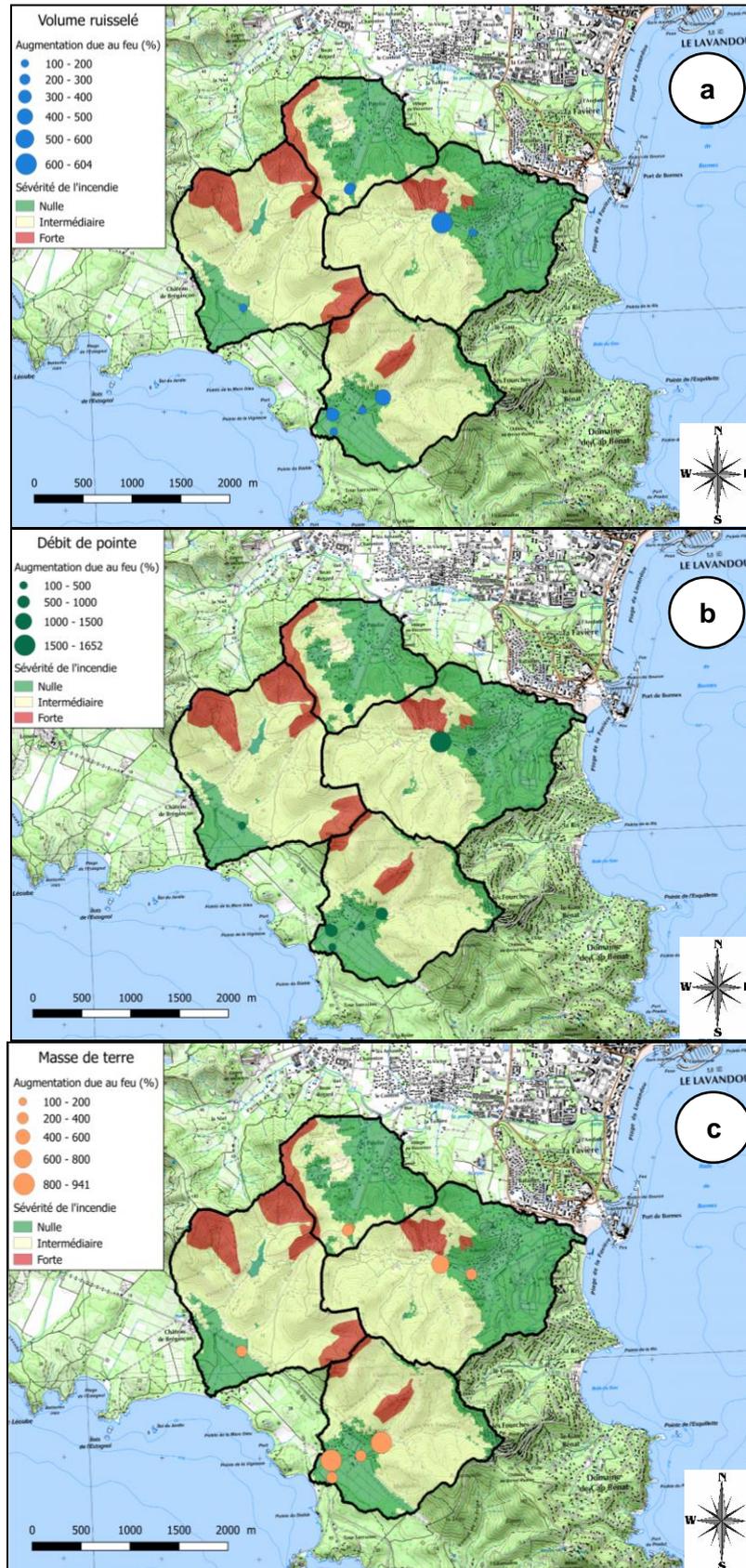


Illustration 40 : Impact de l'incendie sur a) les volumes ruisselés b) le débit de pointe et c) les masses de terre transportées, pour l'évènement décennal. L'emprise et la sévérité de la zone incendiée est également présentée sur fond de carte Scan25 IGN.

Les impacts de l'incendie au niveau des ouvrages sont variés, à la fois spatialement et en terme d'amplitude. On retrouve les résultats obtenus à l'échelle des sous-bassins versants dans la section précédente. L'incendie a provoqué des variations, au niveau des ouvrages, comprises environ entre 100 et 600 % pour le ruissellement, 100 et 1 650 % pour le débit de pointe, 100 et 950 % pour la masse de terre transportée. En revanche, il est intéressant de noter qu'au sein des sous-bassins, certains comportements particuliers se détachent.

Par exemple, la piste de Cardenon (point 3) présente une forte augmentation du volume d'eau ruisselé (600 %), de la masse de sédiments transportés (770 %) et la plus forte augmentation du débit de pointe de tous les ouvrages étudiés (1 650 %). L'importance de l'impact des incendies est attribuable à plusieurs facteurs : la quasi-totalité de la zone en amont de cet ouvrage est incendiée, il se situe au pied des zones de forte pente et par ailleurs également d'une zone incendiée avec une forte sévérité. Cet ouvrage reçoit donc des écoulements s'étant formés sur des surfaces propices au ruissellement, en terme de quantité comme de vitesse, mais également en terme d'érosion. La proximité au réseau d'écoulement limite par ailleurs les possibilités d'infiltration d'eau, tout comme la proximité entre sources et enjeu limite les possibilités de dépôt de sédiments.

Inversement, l'ouvrage situé au croisement de la route des plages et de la route de Cabasson (point 5) ne présente une surface amont que très faible, la majorité du flux de ruissellement étant capté en amont et redirigé par un fossé plus au nord-ouest. Il s'agit par ailleurs d'une surface qui n'a probablement pas été fortement impactée par l'incendie. En effet, le modèle numérique de terrain à disposition laisse penser que seule la partie est de la parcelle de vigne située au nord de l'ouvrage contribue au ruissellement et à l'érosion. Ainsi, le ruissellement (114 %), le débit de pointe (126 %) et la masse de terre transportée n'ont que peu évolué suite à l'incendie. La création de matériaux disponible par l'incendie a néanmoins contribué à une augmentation significative de la masse de terre transportée (250 %).

Cette analyse suggère une forte disparité spatiale entre les différents ouvrages, ces variations étant par ailleurs dépendantes de la pluie de projet considérée. Ceci limite les possibilités de proposition de solution applicables à toutes les situations. Ainsi, nous proposons par la suite d'analyser chaque ouvrage individuellement : quels sont les désordres particuliers constatés par les services techniques de la ville, quels ont été les changements auxquels ces ouvrages ont été soumis suite à l'incendie, et les propositions d'aménagement visant à limiter ces désordres.

4.7. PRÉSENTATION DES POINTS SENSIBLES, EFFETS DES INCENDIES ET PROPOSITIONS D'AMÉNAGEMENTS

4.7.1. Avant-propos

Les aménagements proposés se basent sur des solutions d'hydraulique douce. Les possibilités suivantes sont employées : fascines, haies, bandes enherbées (ces ouvrages et les coûts associés sont présentés en annexe). Il s'agit de proposer des solutions dont l'installation sera peu coûteuse et simple en terme de technicité et de logistique. La configuration de la région (notamment la topographie marquée) est en effet peu propice à la multiplication d'ouvrages nécessitant une logistique lourde.

Néanmoins, l'importance et la rapidité du cumul des précipitations des pluies de projets, couplée la localisation de ces ouvrages dans des zones drainant des surfaces amont généralement faibles et dont les épaisseurs de sols semblent limitées rends l'efficacité de ces ouvrages moindre, notamment sur la diminution de l'aléa ruissellement. Ils permettront toutefois de diminuer le transport solide. À noter que ces ouvrages, une fois mis en place, demandent à être entretenus afin de maintenir leur efficacité dans le temps.

Concernant la réduction de l'aléa ruissellement, il conviendrait d'affiner l'évaluation de l'épaisseur de sol afin d'affiner la quantification des effets attendus.

Par ailleurs, la configuration à l'amont de certains sites se prêterait à l'installation de mares tampons. Ces ouvrages permettent à la fois de diminuer les volumes d'eau et de piéger des matériaux. Lorsque cette solution était envisageable, elle a été proposée. Les ouvrages correspondants sont limités à des volumes de 500 m³, volume au-delà duquel des contraintes techniques et juridiques en lien avec la Loi sur l'eau interviennent.

Finalement, le modèle utilisé dans cette étude étant un modèle visant à simuler la dynamique du ruissellement, il ne simule la dynamique dans les cours d'eau et les ouvrages que de manière sommaire. Ainsi, certaines actions proposées ci-dessous, signalées par un astérisque*, sont susceptibles de limiter les effets du désordre, mais une quantification des effets ne pourra être proposée.

4.7.2. Fiche 1 : Entrée de la piste de Cardenon

Désordre constaté : éboulement des berges du fossé en 2015 (pré-incendie)

Impact de l'incendie :

Période de retour de la pluie (-)	Augmentation du ruissellement (%)	Augmentation du débit de pointe (%)	Augmentation du transport de matières (%)
10 ans	231	339	235
50 ans	133	181	210

Proposition d'aménagement :

- i) enherbement du thalweg amont pour ralentir l'écoulement et retenir les particules de sols érodées. Améliorera par ailleurs la cohésion du sol ;
- ii) renforcer les berges et faciliter la reprise de la végétation : installation de pieux, de treillis et/ou de géotextile* ;
- iii) utilisation d'un fascinage tressé ou de retenues bois pour retenir les matériaux et casser la pente.

Remarque 1 : la date d'occurrence de l'effondrement indique un désordre dont les causes sont probablement plus profondes qu'un simple effet de l'incendie. Il conviendrait de suivre cette situation sur le moyen et le long terme.

Remarque 2 : possibilité de désordre relevant d'un problème de glissement de terrain plus que d'érosion ; cf. photo b). Si confirmé, ce point demanderait une expertise supplémentaire.



Illustration 41: Illustration de l'entrée de la piste de Cardenon ; le mètre positionné en bordure de fossé, sur la gauche de l'image, est déplié sur une longueur de deux mètres.



Illustration 42 : Mouvement de terrain observé en bordure.

4.7.3. Fiche 2 : Entrée de propriété

Désordre constaté : ouvrage sous-dimensionné, obstruction fréquente, débordement sur chaussée.

Impact de l'incendie :

Période de retour de la pluie (-)	Augmentation du ruissellement (%)	Augmentation du débit de pointe (%)	Augmentation du transport de matières (%)
10 ans	272	449	303
50 ans	126	184	266

Proposition d'aménagement :

- i) installation de fascines, de pieux anti-embâcles et/ou de ralentisseurs dans le fossé en amont (zones non-habitées) pour limiter le débit de pointe les arrivées de matières solides* ;
- ii) enherbement des fossés amont afin de limiter les transferts et améliorer l'infiltration de l'eau ;
- iii) redimensionner les ouvrages*.

Remarque : le colmatage des ouvrages, notamment ceux situés plus en aval, pourrait être attribuable à des effondrements se produisant le long de la route relevant d'un problème de glissement de terrain plus que d'érosion cf. photo c). Si confirmé, ce point demanderait une expertise supplémentaire.



Illustration 43 : Amont de l'ouvrage.



Illustration 44 : a) Ouvrage en entrée de propriété et b) photo prise en aval.

4.7.4. Fiche 3 : Piste de Cardenon

Désordre constaté : débordement du cours d'eau au niveau de l'ouvrage hydraulique, arrachement des berges en aval.

Impact de l'incendie :

Période de retour de la pluie (-)	Augmentation du ruissellement (%)	Augmentation du débit de pointe (%)	Augmentation du transport de matières (%)
10 ans	604	1652	770
50 ans	170	263	526

Proposition d'aménagement : en amont des zones habitées (e.g. amont du vallon de Cardenon, thalweg de la piste du Fournier et thalweg de la piste de la Guariguette) :

- i) reprofilage du chemin d'écoulement pour faciliter les zones de débordement* ;
- ii) installation de ralentisseur à l'écoulement* ;
- iii) installation de pièges à embâcles* ;
- iv) création d'une mare de retenue.

Remarque : le but étant ici de ralentir l'écoulement et de le diffuser en amont de l'ouvrage, cette stratégie pourra provoquer en cas de fort volumes ruisselés des débordements. Elle devra donc être évaluée en fonction de la compatibilité avec l'usage des terres prévue à terme par les gestionnaires locaux.



Illustration 45 : Vu de l'ouvrage (pont busé – 800 mm) (photo prise le 11 décembre 2019).



Illustration 46 : Arrachement en aval. (photo prise le 11 décembre 2019).

4.7.5. Fiche 4 : Entrée de résidence

Désordre constaté : inondation des résidences.

Impact de l'incendie :

Période de retour de la pluie (-)	Augmentation du ruissellement (%)	Augmentation du débit de pointe (%)	Augmentation du transport de matières (%)
10 ans	159	225	259
50 ans	119	145	191

Proposition d'aménagement :

- i) redirection du flux vers le fossé plus au Nord en creusant une noue ou un fossé* ;
- ii) reprofilage du fossé déjà existant de l'autre côté de la route pour limiter les flux et empêcher une surverse* ;
- iii) créer une saignée ou un rehausseur d'entrée de propriété*.



Illustration 47 : Vue depuis l'amont.



Illustration 48 : Vue de l'entrée de la résidence.

4.7.6. Fiche 5 : Carrefour route des plages et route de Cabasson

Désordre constaté : engorgement de la buse entrainement le débordement des écoulements sur la chaussée.

Impact de l'incendie :

Période de retour de la pluie (-)	Augmentation du ruissellement (%)	Augmentation du débit de pointe (%)	Augmentation du transport de matières (%)
10 ans	114	126	251
50 ans	103	103	242

Proposition d'aménagement : travailler de concert avec le domaine viticole pour trouver un compromis permettant i) installation de fascines en amont de la parcelle ii) éventuel aménagement de zones de débordement iii) de zones enherbées non-cultivées afin de favoriser l'infiltration des eaux iv) encourager (si ce n'est pas déjà le cas) un travail du sol limitant le tassement du sol et/ou facilitant l'infiltration (saignée, dents...) v) l'installation d'une haie en bordure aval de parcelle limitera le transport solide en sortie et donc les effets de potentielles coulées de boues sur la route.

C'est ce dernier scénario qui est modélisé.



Illustration 49 : Vue de l'ouvrage.



Illustration 50 : Vue de la vigne à l'amont de l'ouvrage.

4.7.7. Fiche 6 : Passerelle du Chemin du petit fort

Désordre constaté : ruissellement important, débordement de l'ouvrage et passerelle emportée lors d'évènements pluvieux importants.

Impact de l'incendie :

Période de retour de la pluie (-)	Augmentation du ruissellement (%)	Augmentation du débit de pointe (%)	Augmentation du transport de matières (%)
10 ans	303	545	941
50 ans	145	186	583

Proposition d'aménagement :

- i) création d'une noue / d'un fossé afin de canaliser le flux vers le thalweg principal ;
- ii) ré-enherbement du thalweg afin de faciliter l'infiltration de l'eau ;
- iii) installation de ralentisseurs d'écoulement ou successions de seuils*.

Remarque 1 : les ralentisseurs d'écoulement présentent l'avantage de diminuer la vitesse et donc l'énergie de l'écoulement tout en garantissant un flux pérenne aux basses eaux. En cas de fortes eaux, la diminution locale de la vitesse peut néanmoins engendrer des débordements.

Remarque 2 : les successions de seuils présentent l'avantage de limiter l'énergie de l'écoulement en la dissipant localement. En cas de choix de cette solution, il conviendra de s'assurer de la solidité du matériaux sous-jacent ou de le renforcer, afin d'éviter son érosion.



Illustration 51 : Vue de l'ouvrage hydraulique en amont de la passerelle (photo prise le 11/12/2019).



Illustration 52 : Vue de la passerelle. (photo prise le 11/12/2019).

4.7.8. Fiche 7 : Entrée du Domaine du Luxembourg**Désordre constaté** : ravinement du fossé**Impact de l'incendie** :

Période de retour de la pluie (-)	Augmentation du ruissellement (%)	Augmentation du débit de pointe (%)	Augmentation du transport de matières (%)
10 ans	338	217	147
50 ans	145	186	583

Proposition d'aménagements :

- i) installation de ralentisseur d'écoulement ou successions de seuils* ;
- ii) travailler de concert avec le domaine du Luxembourg de manière similaire au point n° 5 : éventuelle amélioration du travail du sol limitant la compaction / améliorant l'infiltration (si non effectué aujourd'hui), aménager des zones d'infiltration privilégiées (bandes enherbées) de débordement / de rétention du flux.

Une solution impactant au minimum le domaine est proposée dans le but de faciliter l'éventuelle acceptation. Il s'agirait de ré-enherber les chemins inter-parcelles sur le domaine afin de décompacter le sol probablement tassé sur ces voies et d'augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol. Cependant, faute d'accès à la propriété, les pratiques du domaine et les chemins d'écoulements modélisés sont incertains. La solution proposée donnera donc des quantifications à préciser par une étude plus détaillée.



Illustration 53 : Illustration du ravinement du fossé. Le mètre positionné en bordure de fossé, sur la droite de l'image, est déplié sur une longueur de deux mètres.

4.7.9. Fiche 8 : Gué du chemin du Bout du Monde

Désordre constaté : débordement au niveau de l'ouvrage hydraulique et fort atterrissement de matériaux.

Impact de l'incendie :

Période de retour de la pluie (-)	Augmentation du ruissellement (%)	Augmentation du débit de pointe (%)	Augmentation du transport de matières (%)
10 ans	417	738	840
50 ans	157	186	551

Proposition d'aménagements :

- i) installation de pieux anti-embâcles dans les zones non-habitées en amont (e.g. thalwegs du Vallon des Conques)* ;
- ii) installation de retenues en amont des zones habitées.

Remarque : les aménagements limitant le ruissellement et le transport de matériaux au droit de cet ouvrage les limiteront également au niveau de la passerelle (fiche 6). Cela peut être bénéfique mais il conviendra cependant de s'assurer que des matériaux sont disponibles dans le lit en aval, afin d'éviter un accroissement local de l'érosion potentiellement délétère.



Illustration 54 : Atterrissement de matériaux au niveau de l'ouvrage hydraulique. Photo fournie par les Services techniques de Bormes-lès-Mimosas.

4.7.10. Fiche 9 : Route communale Malherbe en amont du Camping GCU⁵

Désordre constaté : débordement de l'ouvrage et débordement vers le camping.

Impact de l'incendie :

Période de retour de la pluie (-)	Augmentation du ruissellement (%)	Augmentation du débit de pointe (%)	Augmentation du transport de matières (%)
10 ans	158	275	207
50 ans	123	140	162

Proposition d'aménagements :

- i) redimensionnement de l'ouvrage et du fossé*. Ce dernier se rétrécit en effet sur la fin de son parcours, ce qui contribue à augmenter la vitesse de l'écoulement et à engorger l'ouvrage. Un reprofilage permettrait de limiter cette augmentation de vitesse et faciliter une reprise de la végétation ;
- ii) enherbement du thalweg à l'amont direct de l'ouvrage, où le sol est encore développé ;
- iii) aménagements de fascines afin de faciliter l'entretien de l'ouvrage.

Remarque : l'installation de fascines pourrait générer des embâcles qui conduiraient à un débordement sur la Route du bout du Monde et sur le Domaine du Luxembourg (notamment la parcelle Nord-Ouest). Même si lors de l'inspection de terrain peu de matériaux grossiers ont été repérés dans le chenal (voir photo ci-dessous), il conviendrait de s'assurer d'une circulation limitée de matériaux susceptibles de faire embâcles avant de procéder à cette installation.



Illustration 55 : Arrivée de l'écoulement en amont de l'ouvrage (Photo fournie par les Services techniques de Bormes-les-Mimosas).

⁵ GCU : Groupement Campeurs Universitaires



*Illustration 56 : a) ouvrage en amont du camping b) thalweg en amont de l'ouvrage.
(photos prises le 11/12/2019).*

4.8. QUANTIFICATION DES EFFETS DES AMÉNAGEMENTS PROPOSÉS

Pour chaque point identifié comme sensible, les effets des aménagements sont quantifiés pour les différents scénarios de pluie. Étant donné que ces aménagements seront amenés à être installés dans le futur, seule la configuration de l'occupation des sols actuelle a été utilisée pour les simulations correspondantes. Un résumé des actions proposées est présenté en illustration 57.

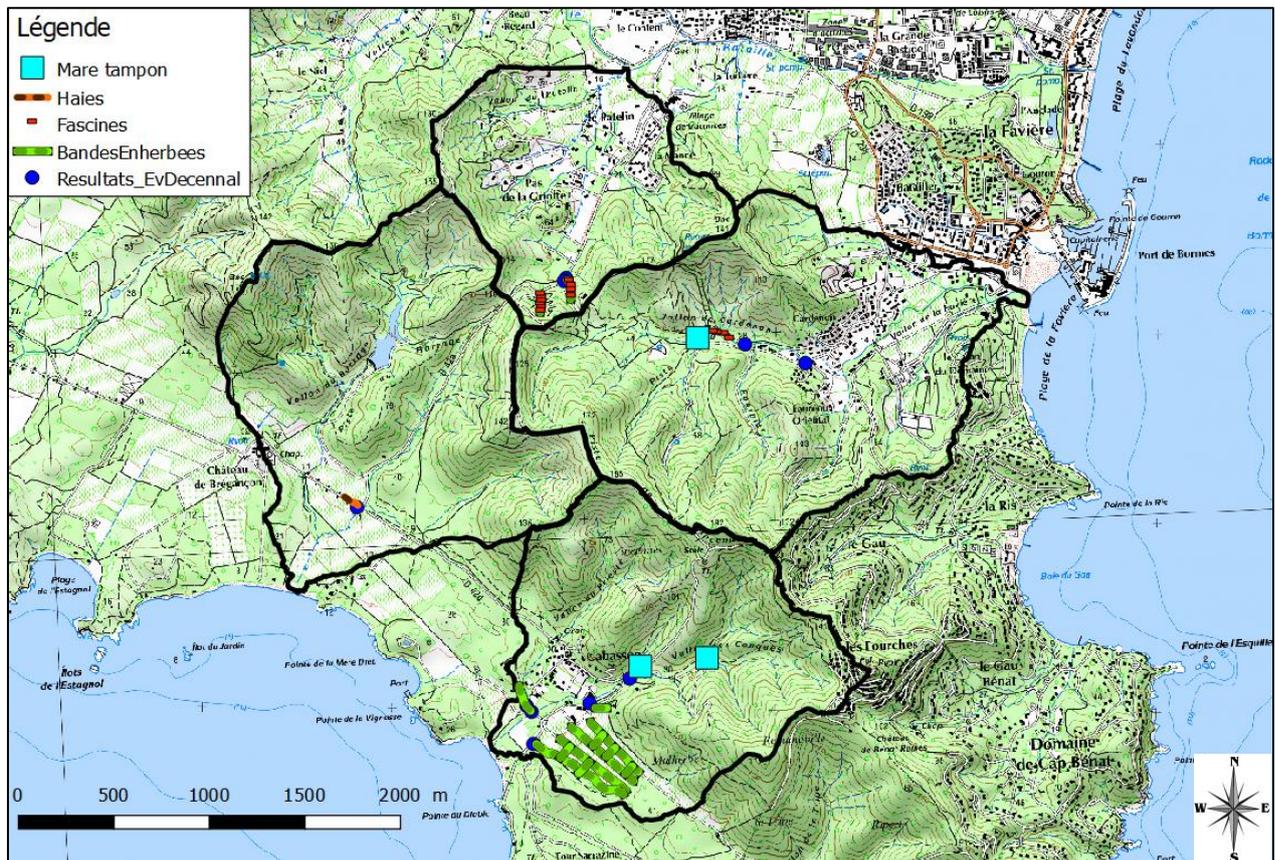


Illustration 57 : Localisation des ouvrages et localisation des aménagements proposés.

Il est important de préciser que le point numéro 6 identifié par les services techniques de la ville présente en fait deux points dont les modes d'actions seront distincts : l'engorgement de la buse du fossé présent en rive droite de la route, et le fossé principal avec la passerelle. Par la suite, les résultats seront donc séparés pour chacun de ces deux cas.

Ainsi, dans les graphiques suivants, les identifiants sont adaptés selon l'illustration 58.

Fiche	1	2	3	4	5	6	-	7	8	9
Identifiant	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Illustration 58 : Correspondance entre numéro de fiche et identifiants présentés ci-dessous.

Par ailleurs, il est rappelé concernant la fiche 7 (domaine du Luxembourg) que les réseaux d'écoulements au sein des parcelles ne sont probablement pas bien représentés par le modèle numérique de terrain à disposition. Ils sont en effets très influencés par les aménagements au sein des domaines. Les propositions d'aménagements considèrent donc comme présenté des bandes enherbées le long des chemins secondaires, mais également le long d'un chemin d'écoulement préférentiel. Cette configuration est supposée réaliste car les chemins

constituent souvent des topographies propices à la canalisation des écoulements, par exemple du fait du tassement local du sol.

Les résultats (Illustration 59) montrent des résultats contrastés.

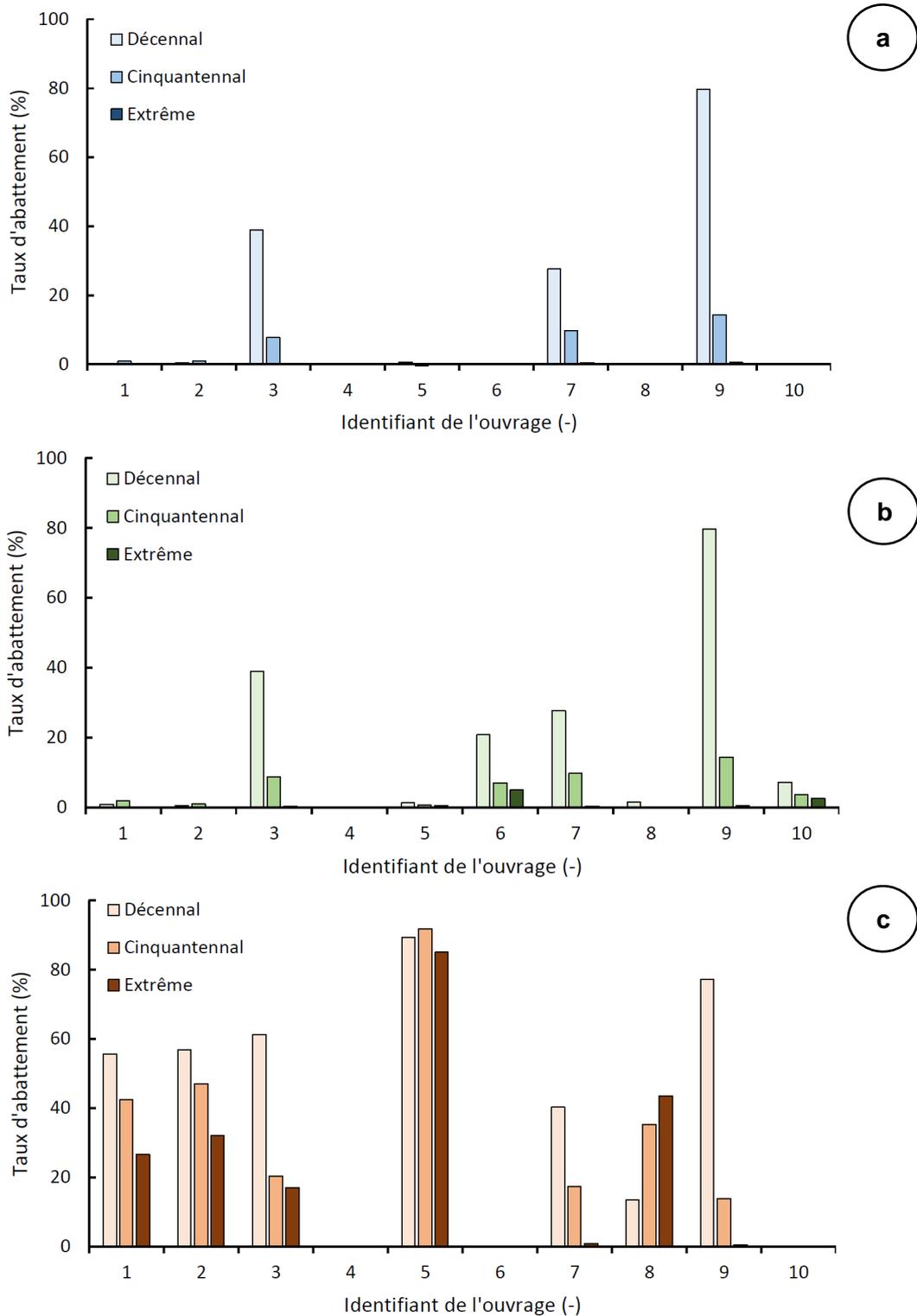


Illustration 59 : Effet des aménagements proposés sur a) le ruissellement, b) le débit de pointe et c) les masses transportées, au droit des aménagements.

Comme pressenti, l'importance du cumul de précipitations sur une faible durée et les faibles épaisseurs de sols limitent l'efficacité des ouvrages vis-à-vis de la réduction de l'aléa ruissellement. Seule l'installation de mares tampons (proposée en amont des ouvrages 3, 7 et 9) permet un impact significatif sur le ruissellement pour la pluie décennale, compris entre 28 % et 80 %. Au-delà, les volumes impliqués sont trop importants pour avoir un effet significatif ; dès la pluie cinquantennale, la réduction du ruissellement est limitée à 14 % dans le meilleur cas.

Il est intéressant de noter que si l'installation d'obstacles à l'écoulement et la réduction correspondant de la vitesse d'écoulement ne permettent pas d'infiltrer significativement plus d'eau, ils réduisent néanmoins jusqu'à 21 % les débits de pointes simulés au droit des ouvrages 6 et 10. Autrement dit, ils ne changent pas le volume total de ruissellement, mais étalent celui-ci dans le temps. Étant donné que ces ouvrages ont été identifiés comme susceptibles à l'engorgement, la mise en œuvre de cette solution paraît donc pertinente à étudier.

Les impacts les plus significatifs sont attendus pour le transfert de matériaux. En moyenne pour la pluie décennale la réduction est de l'ordre de 45 %. Ce taux chute à 30 % pour la pluie cinquantennale et 23 % pour l'évènement extrême. Pour ce dernier cas, il convient cependant de rappeler que le modèle utilisé n'a jamais été employé sur des évènements d'une telle ampleur et que les chiffres d'abattement obtenus sont probablement surestimés. Un résultat qui peut sembler paradoxal est obtenu pour les ouvrages 5 et 8 : l'abattement augmente entre l'évènement décennal et cinquantennal pour le 5, et augmente avec l'intensité de l'évènement pluvieux pour le 8. Il s'agit d'ouvrages dont la surface contributrice amont et les pentes sont faibles (parcelles de vignes). Les aménagements proposés ne se retrouvent donc pas saturés par la masse de matériaux à arrêter, et contribuent à stopper de plus en plus de matériaux avec l'augmentation du flux correspondante. Il convient à nouveau de souligner que les chiffres obtenus pour l'évènement extrême (43 % d'abattement) sont probablement surestimés.

Finalement, les identifiants 4 et 6 (Entrée de résidence et Passerelle) présentent des impacts non-quantifiés car il s'agirait de re-diriger le flux. Il conviendrait d'étudier les chemins d'écoulement si adoption de ces mesures afin de pouvoir quantifier leurs effets.

5. Conclusions

L'étude présentée est allée de l'inventaire et la cartographie de terrain à la modélisation numérique en passant par de l'analyse de données pluviométriques et spatiales.

Des données ont été collectées dans la littérature, au sein de bases de données IGN, sur la base d'échanges avec des acteurs locaux et nationaux (notamment l'ONF) et ont été utilisées pour caractériser le territoire, préalable indispensable à la modélisation. Ainsi, l'occupation des sols, leur épaisseur et la lithologie de la région ont été spatialisées sur le territoire. Par ailleurs, l'étendue ainsi que l'intensité de l'incendie et son évolution de 2017 à 2019 ont été recréées. Il a ainsi été quantifié que 65 % du territoire avait été affecté par l'incendie à des intensités diverses. La quasi-totalité de certains sous-bassins sont affectés, d'autres ne le sont que partiellement. Ces données ont été utilisées afin de créer les données d'entrées nécessaires aux modélisations. La méthodologie de modélisation a par ailleurs été adaptée sur la base de la bibliographie afin de prendre en compte les changements de propriétés hydrologiques et érosives induites par les incendies.

Au total, quinze scénarios de modélisations sont effectués. Ils ont permis de quantifier le sur-aléa ruissellement et érosion généré par l'incendie, et son évolution dans le temps. Il en ressort notamment que l'incendie a généré un sur-aléa ruissellement et érosion fort, pouvant localement générer, en accord avec la littérature, des coefficients de ruissellement de l'ordre de 10 % à 20 % et des taux d'érosions de l'ordre de 1 à 10 t.ha⁻¹ sur un territoire auparavant occupé par de la végétation, donc théoriquement bien moins sensible à ces aléas.

En termes de sensibilité face à l'aléa ruissellement et érosion, il est montré que pour les scénarios de pluie choisis dans cette étude, la pluviométrie domine la majorité de la réponse hydrologique et érosive du bassin versant. L'état hydrique initial du sol influence peu les résultats, tandis que les effets de l'incendie sont moins prononcés, bien que toujours très largement perceptibles pour une pluie cinquantennale que pour une pluie décennale. De manière générale, l'incendie augmente, par ordre croissant d'importance : le volume ruisselé, le débit de pointe et la masse de matériaux transportés. Finalement, les simulations montrent que les surfaces ruisselantes augmentent avec la période de retour, et que la quasi-totalité de la surface des bassins versants présentent du ruissellement lors de la simulation utilisant l'évènement extrême.

Enfin, d'un point de vue pratique, un inventaire de terrain des ouvrages potentiellement à risque a été mené et un échange avec les services techniques de la ville a permis d'identifier neuf points particulièrement impactés par le ruissellement et le transport de matériaux. Des propositions d'aménagements d'hydraulique douce sont formulées pour réduire l'aléa érosion face à différents scénarios de pluie. La quantification de leur efficacité par modélisation montre que leur efficacité vis-à-vis du ruissellement est souvent limitée ; à la fois par l'importance des épisodes pluvieux utilisés lors des simulations, mais également par leur localisation en aval de zones dont les faibles épaisseurs de sols. Ainsi, l'augmentation de la capacité d'infiltration correspondante est rendue peu utile car la colonne de sol se sature au cours des simulations. En revanche, la diminution de la vitesse de l'écoulement et la création d'obstacles permettent de diminuer de manière significative la quantité de matériaux érodés qui seront transportés vers les ouvrages identifiés comme problématiques.

6. Bibliographie

- Arthaud, F., Matte, P.** (1966) - Contribution à l'étude des tectoniques supersosées dans la chaîne hercynienne: étude microtectonique des séries métamorphiques du Massif des Maures (Var). *C R Acad Sci Paris*, **262**:436–439
- Autran, A., Cogné, J.** (1980) - La zone interne de l'orogène varisque dans l'Ouest de la France et sa place dans le développement de la chaîne hercynienne. Colloque C6 Géologie de l'Europe 26ème C G I, *Mém Bur Rech Géol Min*, Orléans, **108**:90–111
- Beck H.E., Zimmermann N.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Wood E.F.** (2018) - Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, **5**:180214
- Beven K.J., Kirby M.J.** (1979) - A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, **24(1)**:43-69
- Catani F., Segoni S., Falorni G.** (2010) - An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, **46**, <https://doi.org/10.1029/2008WR007450>
- Cea L., Legout C., Grangeon T., Nord G.** (2016) - Impact of model simplification on soil erosion predictions: application of the GLUE methodology to a distributed event-based model at the hillslope scale. *Hydrological Processes*, **30**:1096-1113
- Colas B., Vignerot B., Landemaine V., Vandromme R.** (2017) - Impact des incendies de l'été 2017 en Haute Corse sur les phénomènes de mouvements de terrain. Rapport BRGM RP-67411-FR. 109 pp
- Landemaine V.** (2016) Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : Analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. *Thèse de doctorat de l'université de Rouen Normandie*. 235 pp
- Landemaine V. avec la collaboration de Ludwig B.** (2019) - Étude des phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols sur le bassin de la Scarpe. Rapport final, BRGM/RP-68878-FR
- Lavabre J., Martin C.** (1997) - Impact d'un incendie de forêt sur l'hydrologie et l'érosion hydrique d'un petit bassin versant méditerranéen. Human Impact on Erosion and Sedimentation (Proceedings of Rabat Symposium), *IAHS Publication* **245**:39-47
- Ludwig B., avec la collaboration de Landemaine V.** (2017) - Étude hydraulique du bassin versant de Hem-Hardinval. Rapport final, 1680028.
- Marçot N. avec la collaboration de Lacquement F., Thierry Y., Colas B., Vandromme R., Bouroullec I., Allanic C., Lopez S., Mirgon C.** (2018) - Principes méthodologiques pour l'intégration du facteur « altération » dans l'évaluation d'un potentiel de rupture en domaine de socle – Application sur le Massif des Maures (Var - France). Rapport final, BRGM/RP-65819-FR
- Matte P.** (1986) - Tectonics and plate tectonics model for the Variscan belt of Europe. *Tectonophysics*, **126**:329–374

Shakesby (2011) - Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future directions. *Earth Sciences Review*, **105**:71-100.

Soulis K.X., Dercas N., Valiantzas J.D. (2012) - Wildfires impact on hydrological response – The case of Lykorrema experimental watershed. *Global NEST Journal*, **14(3)**:303-310

Soulis K. X. (2018) - Estimation of SCS Curve Number variation following forest fires. *Hydrological Sciences Journal*, **63:9**, 1332-1346

Teissier du Cros B. (2018). - Restauration des terrains incendiés de l'été 2017 sur les communes de Bormes-lès-Mimosas, La Londe les Maures, Hyères-les-Palmiers. Rapport ONF. 146 pp

Thierry Y., Lacquement F., Marçot N. (2018) - Landslides triggered in weathered crystalline rocks of moderate latitudes : A case study in Mediterranean environment (The Maures Massif, France) – *Engineering Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.002>

Vieira D.C.S., Fernández C., Vega J.A., Keizer J.J. (2015) - Does soil burn severity affects the post-fire runoff and interrill erosion response? A review based on meta-analysis of field rainfall simulation. *Journal of Hydrology*, **523**:452-464

Vieira D.C.S., Malvar M.C., Fernández C., Serpa D., Keizer J.J. (2016) - Annual runoff and erosion in a recently burn Mediterranean forest – The effects of plowing and time-since fire. *Geomorphology*, **270**:172-183

Vignerot B., Vandromme R. (2018) - Impact des incendies sur les phénomènes de mouvements de terrain. Feu de Sant'Andrea di Cotone (hiver 2017-2018). Rapport BRGM RP-67997-FR. 75 pp

Annexe 1

Analyse des données pluviométriques

Avant-propos

Au démarrage du projet, il avait été choisi d'analyser des chroniques existantes de pluviométrie sur la zone d'étude afin de choisir les pluies de projet parmi les pluies déjà enregistrées. Cependant, le besoin exprimé ayant évolué au cours du projet, l'analyse des pluies effectuée n'a pas été utilisée pour la modélisation. Le travail effectué est toutefois présenté ici afin de le mettre à disposition.

Disponibilité des données pluviométriques

Différentes sources de données ont été utilisées afin de déterminer une pluviométrie d'intérêt. Les données ont été récoltées auprès de la Société du Canal de Provence (SCP) qui dispose de plus de 50 ans données mensuelles au Barrage de Trappan, des Services Techniques de Bormes-lès-Mimosas (ST) qui disposent d'un pluviomètre journalier à Bormes et dont les données années 2017, 2018 et les mois de janvier et février 2019 nous ont été fournies, et en ligne où des données ont été trouvées notamment pour la ville d'Hyères à une résolution d'une demi-heure.

Climatologie de la zone d'étude

Les données disponibles au niveau du barrage de Trappan sont d'une étendue temporelle exceptionnelle puisqu'elles s'étendent de 1966 à 2018. Elles permettent donc d'établir une climatologie pluviométrique précise de la zone d'étude (Illustration A1).

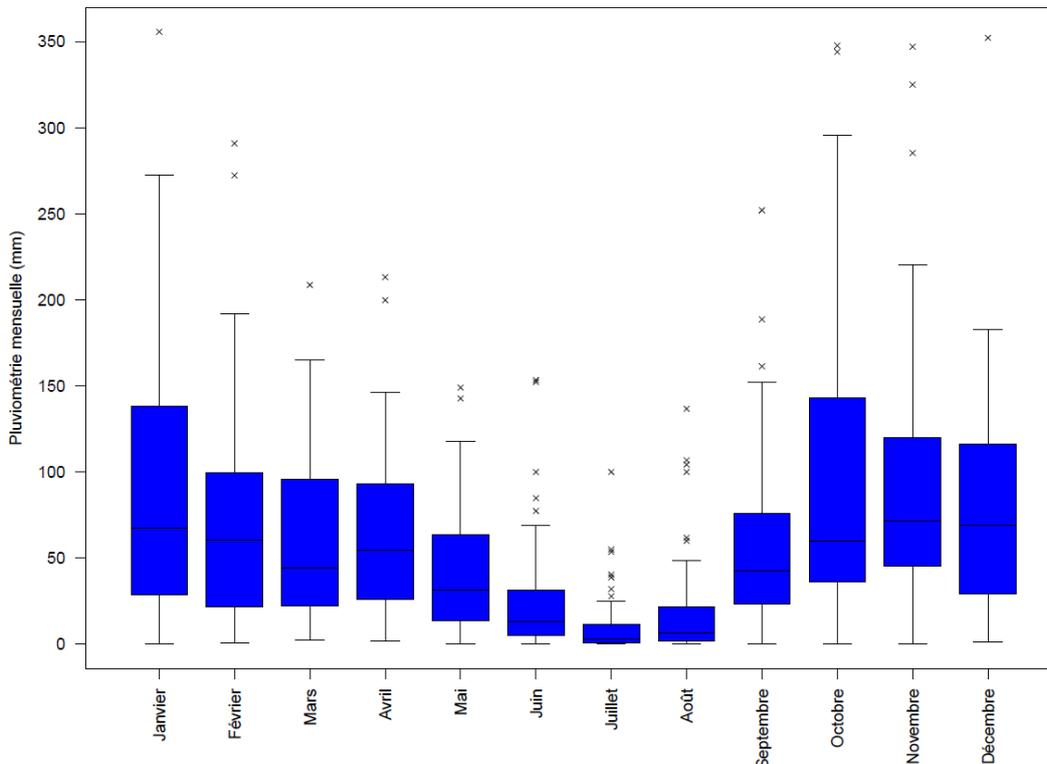


Illustration A1: Climatologie pluviométrique de la zone d'étude. Les étoiles correspondent à des événements exceptionnels, définis comme étant supérieur à 1.5 fois l'écart interquartile de la distribution de chaque mois.

La majorité du cumul pluviométrique, évalué en moyenne à 706 ± 237 mm (moyenne \pm écart-type), se fait sur la période allant d'octobre à janvier, dont la moyenne est de 360 mm, soit 51% de la pluviométrie annuelle se produisant sur une période de 4 mois. Inversement, les précipitations sur la période estivale sont faibles, avec une pluviométrie moyenne de 57 mm sur ces trois mois, soit environ 8% du cumul annuel. Les fortes pluies d'automne et d'hiver, en lien avec les épisodes méditerranéens se produisant dans la région, sont donc des périodes clés à considérer dans la dynamique hydrologique et sédimentaire de la zone. Au sein de cette dynamique, les relevés de deux dernières années montrent une dynamique particulière (Illustration A2).

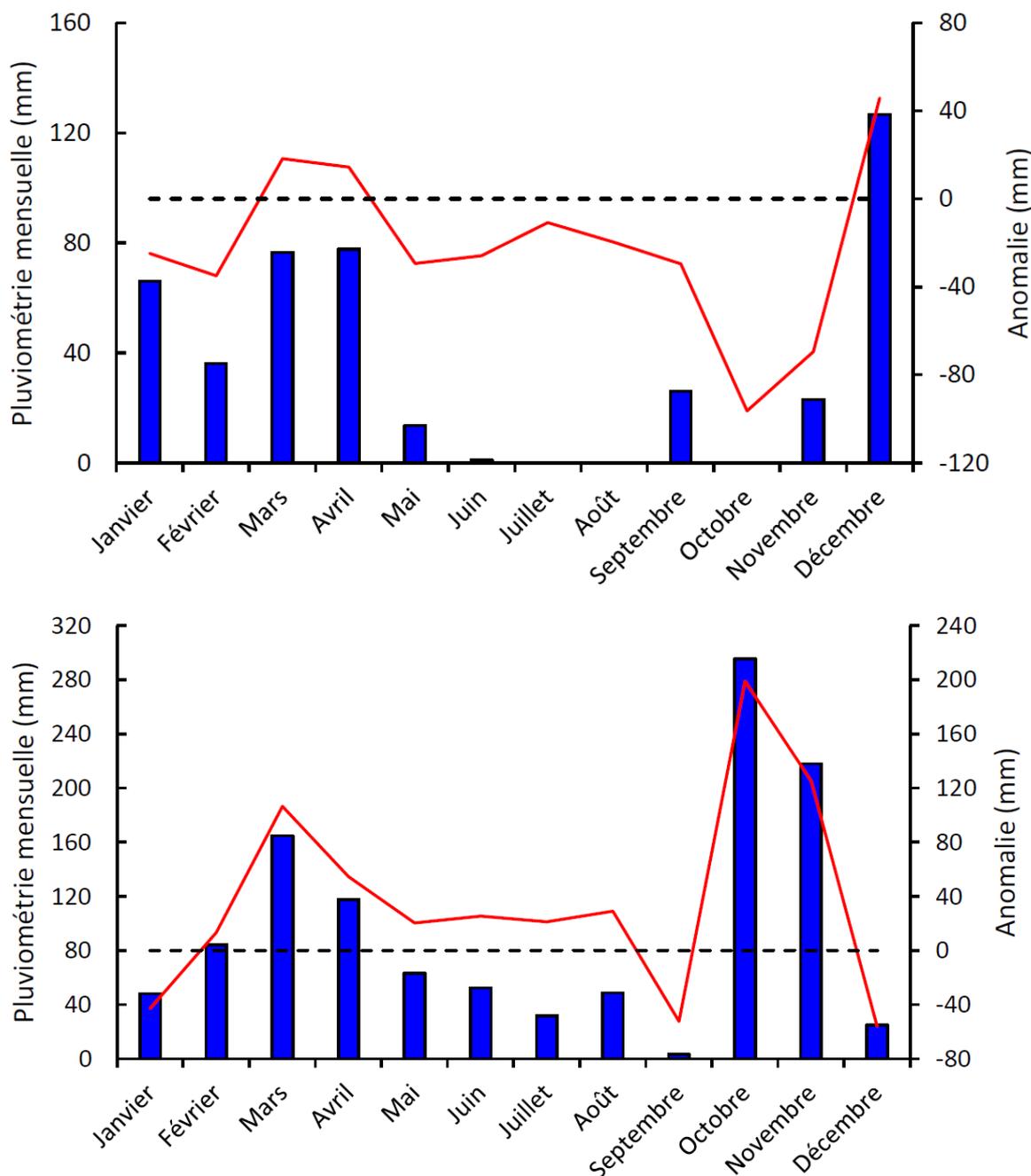


Illustration A2 : Pluviométrie mensuelle au barrage de Trappan, pour l'année a) 2017 et b) 2018. La courbe en rouge présente l'anomalie de pluviométrie, soit la différence entre la mesure mensuelle de

l'année considérée et la moyenne sur toute la période d'enregistrement. La courbe en pointillé noire indique une anomalie nulle.

L'année 2017 a ainsi été particulièrement sèche, avec une anomalie négative sur les trois quarts de l'année, le cumul de mai à octobre étant de seulement 40.5 mm, dont 26 mm précipités au cours du mois de septembre. A l'inverse, la fin de l'année et l'année 2018 ont été humides, avec des précipitations supérieures à la moyenne les trois quarts de l'année 2018. La fin de l'année 2018 a été particulièrement humides ; en effet, octobre et décembre cumulent 513 mm, soit près de 73% du cumul annuel, correspondant à un excédent de 324 mm par rapport aux normales. La situation pluviométrique était donc propice à l'accélération de la propagation de l'incendie, qui s'est déroulé sur des sols anormalement secs. Par la suite, les importants cumuls de pluie ont dû favoriser l'érosion et l'entraînement des particules de sols incendiés. Cette situation a par ailleurs probablement été favorable à une reprise rapide de la végétation.

Comparaison et validation des sources de données

Le modèle fonctionnant à l'échelle de l'évènement pluvieux, la donnée de meilleure résolution temporelle a été celle retenue dans le cadre de cette étude. Néanmoins, il s'agit de celle la plus éloignée du terrain. Une régression spatiale a donc été effectuée pour prendre en compte cet éloignement. Pour ce faire, les données ont été cumulées à l'échelle journalière et mensuelle, et comparées aux deux autres sources de données (Illustration A3). Dans le cas de la retenue de Trapan, il a été choisi de comparer les deux sources de données uniquement sur les 10 dernières années afin de limiter le nombre d'évènements exceptionnels mesurés, variables d'une année sur l'autre. La correspondance avec la pluviométrie de Bormes a été faite à une échelle mensuelle afin de s'affranchir des effets de variations temporelles à cette période (e.g. la vitesse de déplacement de l'orage d'une station de mesure à une autre peut par exemple fausser artificiellement cette comparaison).

La correspondance entre les différentes sources de données est bonne, notamment avec les données de Bormes-lès-Mimosas, dont le pluviomètre est localisé à proximité immédiate de la zone d'étude. Le coefficient de détermination de 94% indique une dispersion peu importante, la pente de 94% soulignant un biais peu important. Aucune tendance temporelle, notamment liée à la saisonnalité, n'a été détectée quant aux sources de variabilité induisant cette dispersion et ce biais. Cette analyse montre donc que les données de meilleure résolution temporelle sont représentatives de celles enregistrées sur la zone d'étude, à la fois vis-à-vis de la variabilité temporelle, par comparaison avec les valeurs long terme disponibles au barrage de Trapan (Illustration A3 a), mais également de la variabilité spatiale par comparaison avec les données de Bormes-les-Mimosas et du barrage de Trapan (Illustration A3 a et b).

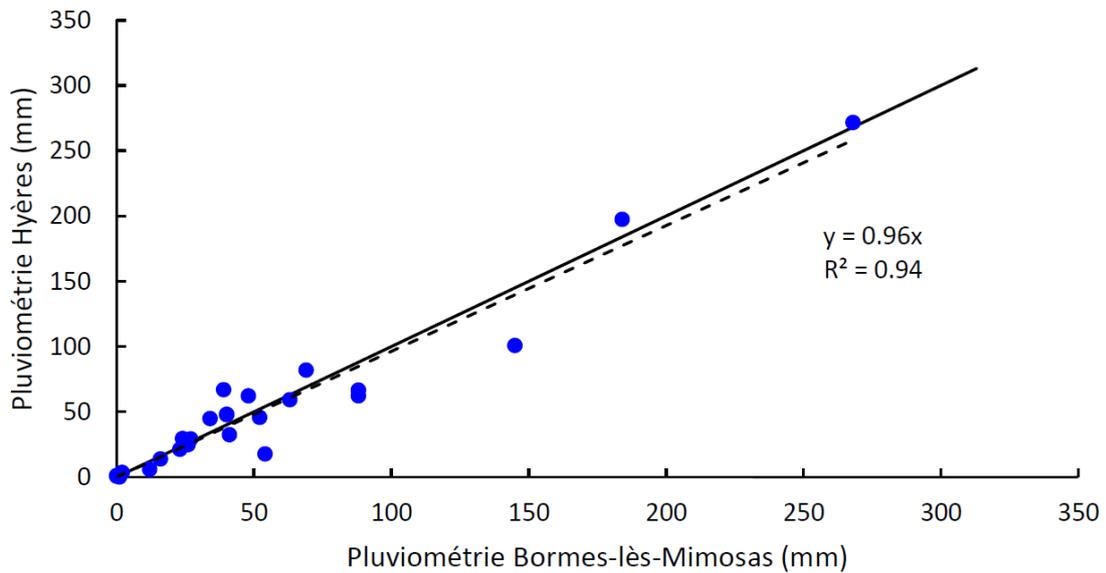
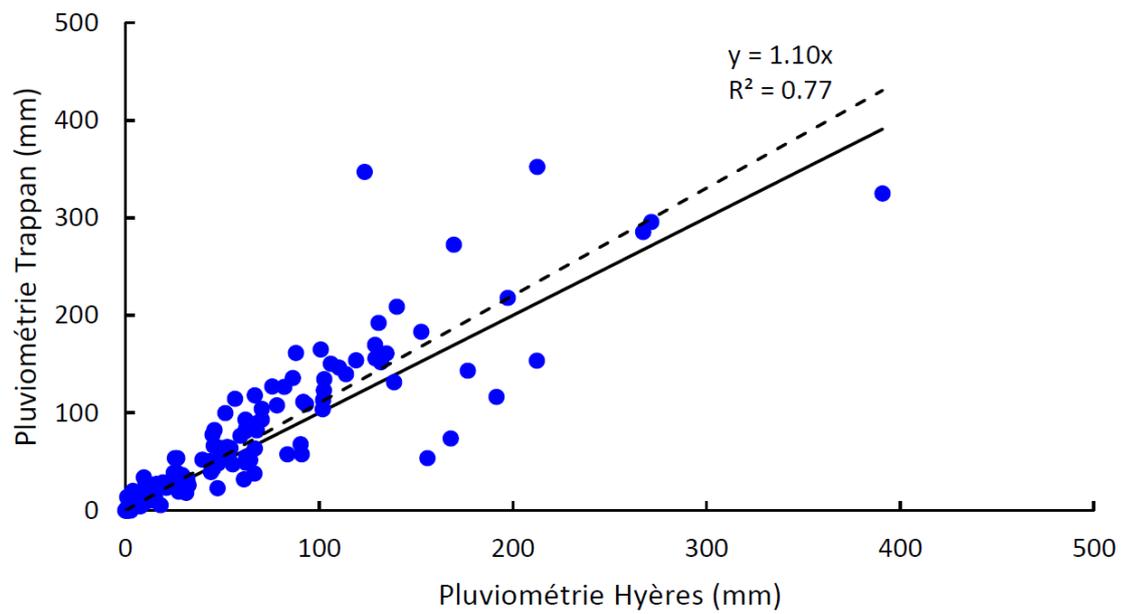


Fig. A3 : Comparaison de la pluviométrie haute fréquence avec celle plus basse fréquence

Annexe 2

Illustrations de solutions de remédiation contre le ruissellement et l'érosion des sols

Avant-propos

Les illustrations et quantifications proposées dans ce document sont issues des études de Ludwig et al. (2017) et Landemaine et al. (2019).

Bandes et chenaux enherbés

Le chenal enherbé se distingue de la bande enherbée par sa localisation sur l'axe des écoulements concentrés. Son tracé est souvent en plein champ perpendiculairement au sens du travail du sol. Le chenal enherbé assure :

- La protection du sol contre l'érosion par ruissellement concentré,
- Le ralentissement et l'étalement les écoulements.

Afin de permettre une concentration du ruissellement diffus produit par la parcelle de part et d'autre du chenal enherbé, aucune fourrière ni dérayure ne doivent être présentes en limite culture et chenal.



Illustration A4 : Chenal enherbé implanté dans l'axe du ruissellement concentré (encart : situation initiale)



Illustration A1 : Chenal enherbé en fond de vallon (source AREAS)

Haie hydraulique et haie sur merlon

La haie est un aménagement d'hydraulique douce nécessitant une emprise moindre que la bande enherbée, d'une largeur entre 1,5 à 2,5 m. En revanche, elle n'acquière une réelle efficacité comme frein hydraulique au bout de 4 à 5 ans (réduction de l'ordre de 15% sur le débit de pointe), sous réserve d'une très forte densité de tiges au ras du sol (idéalement 40 tiges / m²).

L'implantation d'une haie nécessite au minimum 6 plans par m², un paillage du sol au droit de la haie, et une taille de forme et désherbage les 3 premières années. Puis, un seul entretien par rabattage des tiges est suffisant. L'efficacité de la haie est renforcée en l'implantant sur un merlon, ou à minimum sur une bute.



Illustration A2 : Exemple d'une haie dense



Illustration A3 : Exemple de haie sur merlon

Fascine

La fascine est l'aménagement d'hydraulique douce linéaire présentant la plus grande efficacité comme frein hydraulique et est immédiatement opérationnelle. Elle présente également l'avantage de nécessiter une largeur restreinte, de l'ordre de 1 m.

En revanche, elle nécessite un regarnissage régulier des fagots pour pérenniser son efficacité dans le temps. Ce regarnissage doit être réalisé tous les 3 à 5 ans.



Illustration A4 : Fascine en plein champ (encart : dépôt sédiment au droit d'une fascine)

La fascine est généralement positionnée en aval d'une zone à forte production de ruissellement diffus (parcelle à forte pente), ou en travers d'un ruissellement en coin de parcelle ou sur axe de concentration. Il faut néanmoins veiller à ne pas implanter une fascine trop en aval, sous risque d'une rupture de la fascine par pression hydraulique.

Mare tampon

La mare tampon est un ouvrage d'écrêtement de crue par stockage temporaire des eaux de ruissellement. Ce stockage est réalisé par un volume tampon utile, dont la vidange doit se faire rapidement pour redonner à l'ouvrage sa capacité nominale. Cette vidange est ainsi de préférence assurée par une buse de débit de fuite (fortement plus rapide que par infiltration). Il est recommandé de concevoir la mare tampon sous forme de mare écologique avec maintien d'un volume d'eau permanent au cœur de l'ouvrage.

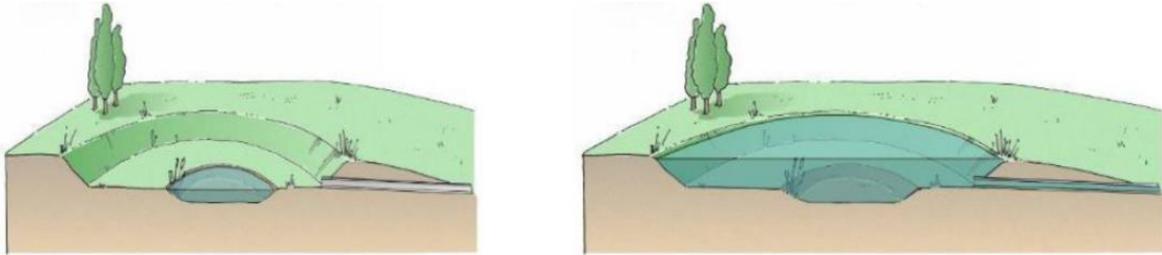


Illustration A9 : Schéma de fonctionnement d'une mare tampon, à gauche : situation « à sec », à droite : situation en fonctionnement



Illustration A5 : Exemple de mare tampon de grande capacité

Coûts unitaires des ouvrages

Aménagement proposé	Coût unitaire (€ HT)	Unité
Bande enherbée	0.25	Mètre carré
Chenal enherbé	50	Mètre linéaire
Haie	20	Mètre linéaire
Fascine	75	Mètre linéaire
Noue	30	Mètre linéaire
Fossé	30	Mètre linéaire
Pieux anti-embâcles	250	Coût unitaire
Rehausse accès propriété privée	500	Coût unitaire
Zone inondable	9 à 40	Mètre cube
Mare	15 à 100	Mètre cube



Centre scientifique et technique **Direction régionale**
Direction Risques et Prévention – Unité **Provence-Alpes-Côte d’Azur**
Risques instabilités gravitaires et érosion des 117 avenue de Luminy - BP 168
versants et des sols 13276 Marseille Cedex 9
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France –
Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr