



Interreg



UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Livrable 7

IMPACT DES EVENTUELS SCENARIOS DE GESTION FORESTIERE SUR LE RUISSELLEMENT (L7)



Emmanuel GARBOLINO – Centre de recherche sur les Risques et les Crises – CRC / ARMINES

Manon Le Gourrierc (GEOCONSULT) et Dennis Fox – UMR ESPACE – CNRS

Décembre 2019



Table des matières

Remerciements	3
1. Contexte et objectifs de l'étude	4
2. Méthodologie	4
2.1. Approche phytoclimatologique pour l'évaluation du potentiel de végétation	5
2.2. Complémentarité des approches	7
3. Résultats de la dynamique des milieux	7
3.1. Parcelles forestières de Camp Bourjas (Collobrières, 83043)	8
3.2. Massif de La Colle Noire (Le Pradet, 83098)	11
3.3. Bois de Courbebaisse (Le Pradet, 83098)	14
4. Synthèse sur la dynamique des milieux prospectés	15
4.1. Parcelles forestières de Camp Bourjas (Collobrières, 83043)	15
4.2. Massif de la Colle Noire (Le Pradet, 83098)	16
4.3. Bois de Courbebaisse (Le Pradet, 83098)	17
4.4. Synthèse des trajectoires évolutives	17
5. Quelles perspectives de gestion des milieux forestiers ?	19
5.1. Contexte actuel de gestion au niveau régional	19
5.2. Perspectives de gestion au niveau locale	20
5.2.1. Le développement de l'agroforesterie	22
5.2.2. La gestion des forêts et la valorisation des arbres	23
5.2.3. La gestion des maquis et les potentiels débouchés	23
6. Quels impacts potentiels de la gestion des milieux forestiers sur le ruissellement ?	24
6.1 La Coupe forestière :	24
6.2 Analyse de sols	25
6.3 Le contexte hydrologique :	26
6.4 La modélisation hydrologique :	26
7. Résultats des modélisations hydrologiques ?	27
7.1 Visite de terrain post-coupe :	27
7.2 Analyse du sol :	28
7.3 La modélisation hydrologique :	32
8. Conclusion	35
9. Références	36

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux personnes qui ont contribué à la réflexion relative aux perspectives de gestion des espaces forestiers des secteurs qui ont été prospectés au cours de cette étude, ainsi qu'aux discussions relatives aux problèmes de ruissellement.

En particulier, nous souhaitons remercier :

Madame Christine Amrane, Maire de la commune de Collobrières ;

Monsieur Michel Armandi, Conseiller municipal de la commune de Collobrières ;

Madame Nelly Laprée, Responsable du service environnement et urbanisme, commune de Collobrières ;

Madame Julie Mariton, Coordinatrice du Syndicat Mixte des Maures.

Monsieur Dominique Biquillon, responsable Unité Territoriale Toulon Provence - Pays des Maures, ONF ;

Monsieur Jean-Marc Ortolan, Technicien Forestier, ONF ;

Monsieur Jérémie Dubois, Chef du service partenariat et contractualisation projets, Conseil Départemental du Var ;

Madame Fabienne Tanchaud, Responsable du service chargé des projets forestiers et agricoles, Conseil Départemental du Var ;

Madame Sophie Pesenti, Chargée de projet, Conseil Départemental du Var ;

1. Contexte et objectifs de l'étude

Le projet piloté par l'UMR 7300 ESPACE, a pour objectif d'étudier le potentiel de la forêt méditerranéenne et du milieu péri-urbain pour limiter les ruissellements pouvant conduire à des inondations. Ce projet s'inscrit dans l'action pilote du projet INTERREG ADAPT coordonné par le Département du Var (83). Les communes du Pradet et de Collobrières ont été sélectionnées pour déterminer les sites pilotes de cette recherche. Dans le cadre de ce projet, aux côtés des travaux et des résultats de modélisation hydrauliques assurés par l'UMR 7300 ESPACE, une attention particulière a été portée par ARMINES-CRC sur la contribution des modes de gestion de la forêt dans la filière bois-énergie. L'objectif est d'évaluer le potentiel de cette ressource en prenant en compte le maintien, voire le développement, des services écosystémiques de prévention des inondations.

Ce rapport est relatif au livrable L7 « *Définition des scénarios de gestion forestière* ». Ce rapport a pour objectifs d'évaluer la dynamique des milieux prospectés pour fournir des éléments d'aide à la décision en matière de gestion des espaces naturels à moyen terme (horizon 2050).

Ces résultats sont issus des observations botaniques et des travaux de recherches intégrant des approches socio-écologiques (livrable L2) et phytoclimatologiques.

Les chapitres suivants présentent la méthodologie utilisée pour définir la dynamique à moyen terme des milieux prospectés. Un rappel des principaux résultats de la caractérisation socio-écologique des milieux est fourni et mis en perspective avec les trajectoires évolutives des milieux. L'ensemble des trajectoires évolutives est ensuite présenté et discuté du point de vue de leurs potentielles conséquences du point de vue des ruissellements.

Enfin, une réflexion est proposée sur la contribution de ces résultats scientifiques pour la gestion des milieux et l'aide au développement de la filière bois, notamment de la filière bois-énergie, dans les secteurs prospectés. Cette réflexion a été bâtie en relation avec les parties-prenantes qui ont été consultées lors de la rencontre du 30 septembre 2019 à Collobrières.

2. Méthodologie

Deux approches ont été mobilisées pour appréhender la dynamique à court et moyen termes des secteurs prospectés.

La première, présentée en détail dans le livrable L2, concerne la caractérisation socio-écologique des milieux. En comparant le cortège floristique des milieux prospectés à l'ensemble des milieux rassemblés dans une base de données de plus de 200.000 relevés floristiques, il est possible de calculer les plantes discriminantes de chaque relevé, c'est-à-dire les plantes écologiquement inféodées au milieu prospecté. En règle générale, cette approche permet de vérifier que les plantes observées correspondent bien à celles inféodées aux milieux étudiés. Des plantes non observées mais ayant une écologie très proches font souvent partie des plantes discriminantes : ces plantes, qui constituent ainsi la flore probable des relevés, permettent de préciser l'écologie du milieu prospecté et d'envisager de trouver soit actuellement, soit dans quelques années, les plantes ainsi citées ou encore d'envisager la possibilité d'introduire les taxons probables dans les milieux prospectés (Garbolino *et al.*, 2013).

La seconde méthode consiste en l'évaluation du potentiel de végétation selon le climat actuel et le climat futur à partir d'un étalonnage probabiliste réalisé à l'échelle de la France pour plus 4.000 plantes. Ces résultats permettent d'évaluer le potentiel de colonisation de chaque plante selon les paramètres du climat tels que les précipitations et les températures (Garbolino, 2014 ; Garbolino *et al.*, 2007, 2008). Cette approche a été utilisée notamment pour évaluer l'impact potentiel du

changement climatique sur la ressource ligneuse en France (Garbolino *et al.*, 2017 et 2018) et sur l'évolution du risque d'incendie de forêt (Garbolino *et al.*, 2016 et 2017).

2.1. Approche phytoclimatologique pour l'évaluation du potentiel de végétation

Cette approche est fondée sur un modèle bioclimatique visant à identifier et quantifier les relations apparentes entre la répartition des végétaux et des climats. Ce modèle consiste en un étalonnage probabiliste des relations entre plantes et variables du climat.

Un étalonnage est une procédure qui consiste à comparer des mesures effectuées par un appareil par rapport à un référentiel. Dans le cas de l'étalonnage climatique des plantes, les valeurs climatiques sont considérées comme des référentiels et les plantes représentent les « *instruments* » biologiques de mesure. Le corollaire est que les plantes sont considérées comme des témoins des facteurs du milieu : elles deviennent des indicatrices des mesures climatiques.

De façon pratique, l'effet apparent d'un facteur du milieu (biotique ou abiotique) sur une plante s'exprime par l'occurrence de la plante et de son abondance dans une station donnée. Il est possible de mesurer un facteur du milieu, comme par exemple la température du jour, dans une station ou à proximité de cette dernière. L'étalonnage probabiliste cherche ainsi à connaître dans quelle partie de la gamme d'une variable se trouve une plante (paramètre de position), mais également si cette plante est fréquemment rencontrée dans cette partie de la gamme (paramètre de concentration). Ces deux paramètres de position et de concentration des fréquences définissent d'abord la valeur optimale de la variable dans laquelle une plante peut croître, mais aussi le degré de liaison entre cette valeur et la plante. Dans ce cas, le lien entre plante et variable du milieu est un lien quantitatif, qui s'exprime au sein du gradient défini par les occurrences de la plante dans la gamme de la variable. Le calcul de ce lien a l'intérêt de considérer les plantes comme des indices quantitatifs de variables du milieu et de les utiliser, par la suite, pour estimer les valeurs de ces mesures. Ainsi, toutes les plantes sont considérées comme indicatrices des mesures du milieu, qu'elles soient rares ou fréquentes, leurs liens à l'égard d'une variable étant exprimés par des pourcentages.

Cependant, la répartition d'un taxon sur un territoire n'est pas continue, même si le taxon peut coloniser bien plus de localités que ses observations ne le montrent. Son intermittence est le plus souvent liée à des facteurs contingents comme la capacité de dissémination des semences, la compétition interspécifique ou bien encore l'action anthropique. Il existe donc des hiatus au niveau de sa représentation spatiale et statistique.

Ainsi, un taxon peut présenter des intermittences dans les rangs d'une variable climatique telle que la température, se traduisant par exemple par des occurrences à -5°C et à $+5^{\circ}\text{C}$, sans pour autant qu'il soit observé à 0°C . Evidemment, cela ne signifie pas que ce taxon ne puisse survivre à une température de 0°C , mais le hasard de sa distribution dans la gamme des températures du jour n'a pas permis de repérer des occurrences dans les valeurs intermédiaires. Dans ces conditions, il convient d'utiliser une méthode numérique qui puisse tenir compte de ces intermittences. Ce modèle probabiliste suppose qu'un taxon montre une distribution unimodale dans la gamme d'un facteur climatique. Cette distribution s'exprime par la probabilité pour le taxon de présenter à la fois un optimum (position optimale) dans la gamme du facteur climatique et, par ailleurs, de présenter un pouvoir indicateur (concentration) montrant le degré de liaison entre taxon et facteur.

Trois hypothèses élémentaires relatives aux relations entre plantes et facteurs du milieu suffisent à fonder les calculs proposés (Garbolino *et al.*, 2007) :

- A. L'effet d'un facteur sur une plante suit une tendance unimodale caractérisée par un optimum des fréquences de la plante dans une partie de la gamme de la variable ;

- B. L'effet d'un facteur sur une plante est graduel quelle que soit l'intermittence des fréquences de la plante dans la gamme de la variable ;
- C. Une plante est d'autant plus indicatrice d'un facteur que ses fréquences sont plus concentrées dans une partie de la gamme de la variable. Concrètement, si deux plantes « a » et « b » sont distribuées dans la même partie de la gamme d'une variable, la plante la plus indicatrice sera celle qui aura les fréquences les plus importantes dans seulement quelques rangs de la gamme, même si elles ont le même optimum ;

Pour les calculs, les valeurs des variables sont transformées en rangs. Cette conversion permet de tenir compte de la nature ordinale des données tout en conservant la correspondance avec les mesures.

L'étude stationnelle des relations entre plantes et climats présentée ici a donc nécessité l'utilisation de deux bases de données rassemblant respectivement des observations botaniques et des mesures climatiques réparties sur tout le territoire français :

- Une banque de données botaniques : elle regroupe environ 4 millions d'observations de plantes réparties dans tous les types de milieux de France.
- Les données climatiques de Météo-France : ce sont des données spatialisées sur l'ensemble du territoire français correspondant à des quadrats de 1km de côté : ces données climatiques résultent d'interpolations par krigeage sur les mesures climatiques et de la topographie (Bénichou et Le Breton, 1986). Ces données sont aussi complétées par les données issues des scénarios du GIEC pour 2050.

L'étalonnage probabiliste cherche alors à connaître dans quelle partie de la gamme d'une variable se trouve une plante (paramètre de position), mais également si cette plante est fréquemment rencontrée dans cette partie de la gamme (paramètre de concentration). Ces deux paramètres définissent d'abord la valeur optimale de la variable (appelée « *OPT* ») dans laquelle une plante peut croître, mais aussi le degré de liaison entre cette valeur et la plante (appelé « *CTRA* »). La validation de l'étalonnage est réalisée par l'estimation du climat par la flore se trouvant dans un pixel donné pour lequel les valeurs des paramètres climatiques sont connues. La différence entre climat estimé et climat mesuré (souvent interpolé par krigeage) représente la justesse de l'étalonnage. Appliqué à l'ensemble des taxons étalonnés et sur l'ensemble du territoire français, la valeur moyenne de la justesse de l'étalonnage probabiliste est de 75%, ce qui signifie qu'en moyenne, les plantes étalonnées sont indicatrices des paramètres climatiques avec une fiabilité de 75%.

La modélisation de la distribution spatiale de la flore selon le climat actuel permet d'identifier le potentiel actuel de végétation : cette étape est nécessaire pour distinguer la part du changement climatique dans la dynamique de la végétation par rapport à la reconquête naturelle des végétaux dans les secteurs de déprise des activités anthropiques. Elle permet aussi d'estimer la dynamique de colonisation des végétaux dans des secteurs abandonnés depuis de nombreuses années. D'une certaine façon, la modélisation du potentiel de végétation selon le climat actuel permet de caractériser numériquement et de cartographier des formations végétales potentielles analogues aux séries de végétation. La prise en compte de l'abondance des plantes est originale car elle permet d'étudier la répartition de populations, contrairement aux approches qui ne sont focalisées que sur la simple présence-absence de taxons.

La méthodologie proposée cherche à estimer, en tout point du réseau climatique, la probabilité d'occurrence d'une plante. Pour chacune des plantes étudiées, l'algorithme vérifie si les valeurs de chaque variable climatique du quadrat sont comprises entre les bornes des valeurs pour lesquelles une plante a été observée. Par exemple, pour un taxon dont les bornes climatiques sont comprises dans l'intervalle [+5°C ; +15°C] pour les températures maximales de janvier, l'algorithme recherche tous les

quadrats ayant « *Tmax Janvier* » compris dans cet intervalle. L'algorithme procède ainsi pour les 36 variables climatiques et les quadrats du réseau climatique. Une fois que les quadrats climatiquement favorables à une plante ont été sélectionnés, l'algorithme calcule la valeur de concentration de la plante CTRA, cette valeur étant assimilable à une probabilité puisqu'elle a été établie selon un modèle de distribution unimodale. Un tableau des valeurs de concentration pour chaque variable climatique et pour chaque point est obtenu pour tous les taxons botaniques. La représentation de la répartition spatiale d'un taxon sur le territoire considéré est obtenue en calculant la moyenne des concentrations de toutes les variables de chacun des quadrats, de manière à obtenir une concentration moyenne assimilable à une probabilité moyenne de présence.

Cette logique de calcul a été appliquée pour le climat actuel mais aussi pour le climat futur estimé à l'horizon 2050 en prenant comme référentiel le scénario RCP 6 proposé par le GIEC et les variables Tmin, Tmax et P.

2.2. Complémentarité des approches

Les approches socio-écologique et bioclimatique sont distinctes du point de vue des modes de traitement des données et de la forme des résultats. Mais elles apportent des résultats complémentaires permettant de dresser les tendances évolutives des milieux, principalement pour les raisons suivantes :

- L'approche socio-écologique est, dans une certaine mesure, indépendante des variables du milieu puisqu'elle repose sur la fidélité des plantes entre elles. Cependant, le calcul des plantes écologiquement discriminantes des relevés (plantes témoins du milieu prospecté) permet d'introduire la « *flore probable* » d'un relevé, cette dernière permettant de caractériser la typologie du milieu d'un relevé. Il s'avère aussi que cette flore probable, parce qu'elle indique que le milieu prospecté peut être favorable à telle ou telle espèce végétale, permet d'envisager l'installation naturelle ou assistée d'espèces d'écologie similaire de celles rencontrées sur site. Ces indications permettent d'envisager l'évolution à court terme de la structure floristique de ce type de milieu.
- L'approche bioclimatique est fondée sur l'étalonnage des relations entre plantes et variables climatiques (ainsi que des variables pédologiques) qui permettent de comprendre les affinités pédoclimatiques des taxons étudiés. L'utilisation de la relation inverse permet d'estimer la probabilité de trouver sur un territoire, les milieux les plus favorables pour un taxon donné ou un ensemble de taxons. Le pas de temps proposé ici est l'actuel et le moyen terme (2050). L'évaluation selon le climat actuel donne aussi quelques indications sur les tendances évolutives à court terme, en complément de l'approche socio-écologique. Cette situation doit ensuite être comparée avec l'estimation selon le climat futur (2050) à partir de scénarios fournis par le GIEC (ici RCP 6.0), dans le but d'évaluer la possibilité de changement de structure spécifique des milieux et des conséquences possibles.

L'analyse des résultats de ces deux approches peut être intégrée dans un processus de décision pour la gestion des milieux, notamment des milieux forestiers, dans le but d'en optimiser la mise en œuvre selon les objectifs de gestion fixés (maintien ou non d'une essence spécifique, installation de nouvelles essences, objectifs de prévention des risques naturels etc.).

3. Résultats de la dynamique des milieux

Dans cette partie nous présentons, pour chaque type de milieu prospecté, les résultats de modélisation de la probabilité de présence de milieux favorables aux plantes pour l'actuel et 2050. Ces résultats permettent d'identifier les taxons qui auront probablement le plus de chance de se développer sur les territoires étudiés d'ici à l'horizon 2050. Ces résultats sont issus du modèle bioclimatique précédemment présenté dont l'objectif est d'évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur les milieux naturels. La complémentarité des approches permet ainsi de dresser des scénarios d'évolution potentielle des milieux prospectés.

3.1. Parcelles forestières de Camp Bourjas (Collobrières, 83043)

Ce secteur est une forêt communale pour laquelle l'ONF intervient pour l'aide à la gestion. La commune de Collobrières est certifiée PEFC jusqu'en 2022 (certificat 10-21-19/336).

Du point de vue des formations végétales, ce secteur comprend des bois naturels, des taillis et des maquis de densité variable à *Quercus suber*, *Arbutus unedo*, *Pinus pinaster* et des bois plantés par l'ONF à *Pinus pinaster*, *Pinus pinea* et *Cedrus atlantica*.

L'interprétation des résultats de la caractérisation socio-écologique montre les points suivants :

- La probabilité de trouver en tant que plantes discriminantes des relevés, des taxons ligneux tels que *Quercus ilex*, *Quercus lanuginosa* (*Quercus pubescens*), *Pinus halepensis*, même si parfois ces arbres n'ont pas été directement observés dans les relevés. Cela montre, dans un premier temps, l'appartenance des milieux prospectés au bois à chênes vert qui peut être plus ou moins ouvert et mélangé avec des essences comme le pin d'Alep, voire avec le chêne liège et le chêne pubescent. Il s'agit bien aussi de milieux xérophiles à mésoxérophile de l'étage mésoméditerranéen inférieur.
- En revanche, même dans les milieux où *Quercus suber* a été observé, ce taxon a un pouvoir discriminant inférieur à 10%, sauf pour les relevés 16 et 18. Cela semble montrer que le chêne liège risque de subir la compétition avec d'autres ligneux, en particulier avec le chêne vert (pouvoir discriminant supérieur à 60% dans tous les relevés) mais aussi avec le chêne pubescent (pouvoir discriminant supérieur à 30%) et, dans une moindre mesure, avec le pin d'Alep et le pin maritime. Enfin, notons la contribution du châtaignier en tant que plante discriminante des relevés 18 et 19, ce qui montre la possibilité d'installation de cette essence à forte valeur ajoutée dans le secteur prospecté et pour les conditions environnementales actuelles.

L'étude des plantes discriminantes des milieux prospectés a montré la possible extension du chêne vert et du chêne pubescent, ainsi que des pins d'Alep et maritime selon les conditions actuelles environnementales.

L'étude du potentiel de végétation selon le modèle bioclimatique montre que, pour l'actuel, la commune prospectée pourrait abriter les taxons suivants (tableau 1) :

Tableau 1 : Liste des principales plantes ligneuses probables selon le climat actuel sur la commune de Collobrières.

Taxons	Probabilités
<i>Cistus ladaniferus</i> l.	0.84
<i>Fraxinus oxyphylla</i> m. B subsp. <i>Oxycarpa</i> willd 3-5	0.71

Livable L7

Juniperus oxycedrus l. Subsp. Oxycedrus	0.70
Quercus suber l.	0.70
Calycotome spinosa (l.) Link	0.69
Calycotome spinosa (l.) 3-6	0.68
Erica multiflora l. 4-6	0.68
Quercus suber l. 4-6	0.68
Arbutus unedo l.	0.67
Arbutus unedo l. 3-6	0.67
Erica arborea l. 3-6	0.67
Fraxinus ornus l. 3-6	0.67
Juniperus oxycedrus l. Subsp. Oxycedrus 2-3	0.67
Myrtus communis l.	0.67
Pinus halepensis mill.	0.67
Pinus halepensis mill. 4-6	0.67
Cistus albidus l. 3-6	0.66
Fraxinus ornus l.	0.66
Cistus albidus l.	0.65
Cistus monspeliensis l.	0.65
Cistus monspeliensis l. 3-6	0.65
Erica arborea l.	0.65
Erica multiflora l.	0.65
Ficus carica l.	0.65
Olea europaea l.	0.65
Pistacia lentiscus l.	0.65
Cistus salviaefolius l.	0.64
Juniperus oxycedrus l.	0.64
Juniperus oxycedrus l. 2-6	0.64
Myrtus communis l. 3-6	0.64
Pistacia terebinthus l.	0.64
Pistacia terebinthus l. 2-6	0.64
Quercus coccifera l.	0.64
Quercus coccifera l. 4-6	0.64
Quercus ilex l. 4-6	0.64
Cistus salviaefolius l. 3-6	0.63
Erica scoparia l.	0.63
Erica scoparia l. 4-6	0.63
Olea europaea l. 3-6	0.63
Pinus pinaster soland.	0.63
Pinus pinaster soland. 4-6	0.63
Quercus ilex l.	0.63
Cotinus coccygia (bauhin) mill.	0.61
Fraxinus oxyphylla m. B 3-6	0.61
Pistacia lentiscus l. 3-6	0.61
Pinus pinea l. 4-6	0.58
Juniperus phoenicea l.	0.57
Juniperus phoenicea l. 3-6	0.57

Livrable L7

Fraxinus oxyphylla m. Bieb.	0.56
Sorbus domestica l.	0.56
Acer monspessulanum l. 2-6	0.51
Acer monspessulanum l.	0.50
Castanea sativa mill. 4-6	0.47
Castanea sativa mill.	0.44
Quercus lanuginosa lam.	0.43
Quercus lanuginosa lam. 4-6	0.42

Dans le tableau 7, les taxons observés lors des prospections ont été noté en gras. Le modèle bioclimatique montre bien la probabilité de trouver les principaux taxons observés dans les secteurs prospectés. Ce modèle montre aussi la possibilité de trouver des milieux pouvant actuellement convenir à d'autres ligneux tels que le pin pignon (en partie planté dans les massifs) et le châtaignier.

Pour 2050 (tableau 2), l'étude des probabilités de présence des milieux favorables des plantes sur la commune de Collobrières montre une baisse significative de ces probabilités pour tous les taxons ligneux, ce qui témoigne d'une situation de stress potentiel à l'horizon 2050. Dans la partie nord de la commune et dans les zones plus élevées, notons des probabilités de trouver les milieux favorables aux taxons suivants (en gras sont représentés les taxons observés lors des prospections botaniques) :

Tableau 2 : Liste des principales plantes ligneuses probables selon le scénario climatique de 2050 sur la commune de Collobrières.

Taxons	Probabilités
Pistacia lentiscus l. 3-6	0.73
Olea europaea l. Subsp. Silvestris miller	0.73
Juniperus phoenicea l. 3-6	0.72
Myrtus communis l. 3-6	0.72
Ficus carica l.	0.70
Cistus monspeliensis l. 3-6	0.70
Pistacia lentiscus l.	0.69
Cistus monspeliensis l.	0.69
Myrtus communis l.	0.69
Lonicera implexa aiton 2-6	0.65
Arbutus unedo l. 3-6	0.64
Rhamnus alaternus l.	0.63
Phillyrea latifolia (l.) Fliche	0.62
Erica arborea l. 3-6	0.61
Quercus suber l.	0.61
Cistus salviaefolius l.	0.60
Juniperus phoenicea l.	0.60
Arbutus unedo l.	0.59
Quercus ilex l. 4-6	0.57
Erica arborea l.	0.56
Quercus ilex l.	0.55

Ces résultats soulignent, dans une certaine mesure, la persistance sur la commune de Collobrières en 2050 des taxons déjà observés lors des prospections botaniques. Mais ils doivent être nuancés en raison de la baisse significative des probabilités d'occurrence des taxons sur les zones de prospections (probabilités inférieures à 10% pour tous les taxons ligneux), ce qui témoigne de risques de stress et de dépérissement des massifs forestiers actuellement établis sur la commune d'ici à 2050.

Ces estimations interpellent sur la stratégie à développer pour conserver, voire développer, les ressources ligneuses de la commune à l'horizon 2050 et, par conséquent, sur le potentiel de développement de la filière bois (en particulier bois énergie) à moyen terme.

En effet, le dépérissement des chênes lièges en lien notamment avec la situation de stress hydrique des années successives à 2015 a impacté l'état de santé des chênes lièges et a favorisé le développement de ravageurs. Ces épisodes de sécheresse vont très probablement s'intensifier dans le futur comme le montrent les pronostics des climatologues. Ils auront vraisemblablement des conséquences néfastes sur le taux de mortalité et le développement de cette espèce. Rappelons aussi que le développement et le maintien du chêne liège est principalement lié aux activités humaines pour la production de liège et ce depuis au moins 200 ans dans le département du Var.

Par ailleurs, les coupes d'amélioration des parcelles 17 et 19 effectuées en février 2019 et valorisées en bois-énergie, vont probablement renforcer, dans les zones de prélèvement des arbres, le maintien de la strate arbustive de type maquis dense, elle-même probablement favorisée à l'avenir par le changement climatique.

3.2. Massif de La Colle Noire (Le Pradet, 83098)

Ce secteur est un massif forestier comprenant un maquis dense (avec quelques pieds de chêne liège et de pin d'Alep) et des bois à *Quercus suber* souvent en mélange avec *Pinus halepensis*. L'ONF intervient pour la gestion de ce massif.

Ce secteur a connu un incendie du 4 au 5 août 2005 qui a ravagé plus de 150ha de végétation. Avant cet incendie, la végétation de la Colle Noire était représentée par une forêt méditerranéenne à *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Quercus suber*, *Quercus ilex*, *Arbutus unedo* et *Pistacia lentiscus*. Pour limiter l'érosion après incendie, des fascines ont été réalisées. D'anciens caniveaux existent mais ne sont pas entretenus et se sont comblés par des sédiments et la végétation.

Nous retrouvons aujourd'hui des bois ouverts à *Quercus suber* qui regroupent des espèces thermophiles et xérophiles sur sol siliceux souvent peu évolués. La strate arbustive est souvent très dense dans ces peuplements et la strate herbacée est par conséquent peu développée. Parmi les espèces colonisant ce milieu, on peut rencontrer *Arbutus unedo*, *Pinus halepensis*, *Viburnum tinus*, *Quercus ilex*, *Cistus salviifolius*, *Smilax aspera*, *Ruscus acculeatus*, *Cistus monspelliensis* et *Pistacia lentiscus*. Actuellement il y a peu ou pas d'actions sylvicoles : les seules actions concernent des travaux de DFCI essentiellement pour maintenir en état opérationnel les ouvrages et réduire la densité de la végétation aux abords des voies d'accès par du débroussaillage. Le bois coupé est ensuite prélevé par les riverains pour leur usage personnel. Les quantités sont très faibles (moins de 20m³).

Du point de vue évolutif, ce type de milieu tend à se refermer pour constituer une suberaie pouvant accueillir aussi du chêne vert, voire être dominée par le chêne vert.

Les résultats analytiques de la caractérisation socio-écologique des milieux prospectés montrent que :

- Les plantes les plus discriminantes des relevés sont le plus souvent des plantes observées (ex : *Rubia peregrina*, *Erica arborea*, *Arbutus unedo*, *Quercus ilex*, *Pinus halepensis* et *Pinus pinaster*). Les résultats montrent aussi un haut niveau de pouvoir discriminant pour *Quercus lanuginosa* (*Quercus pubescens*) dans tous les relevés, soulignant la possibilité de trouver ce taxon plus fréquemment que ce qu'il a été observé lors des prospections. Ces résultats soulignent le caractère actuel xérophile et thermophile des milieux prospectés et une potentielle évolution de fermeture sylvatique mésoxérophile à mésophile.
- Les milieux prospectés sont en phase de reconquête post-incendies et leur cortège floristique montre une dynamique de fermeture des milieux passant d'un stade de maquis à bruyère arborée et arbousier vers une chênaie mélangée avec par endroits, un stade transitionnel de colonisation des pins d'Alep et maritimes. La gestion de ces milieux, en particulier nécessaire pour la prévention du risque incendie et pour favoriser le développement des chênes, peut apporter de la biomasse ligneuse pouvant être valorisée du point de vue énergétique.

Les résultats pour l'évaluation du potentiel de végétation de la Colle Noire selon le climat actuel (tableau 3) montrent la possibilité de trouver les milieux favorables aux taxons suivants :

Tableau 3 : Liste des principales plantes ligneuses probables selon le climat actuel sur la commune du Pradet.

Taxons	Probabilités
Ceratonia siliqua l.	0.83
Olea europaea l. 3-6	0.82
Myrtus communis l. 3-6	0.81
Ceratonia siliqua l. 3-5	0.81
Pistacia lentiscus l. 3-6	0.80
Olea europaea l. Subsp. Silvestris miller	0.80
Myrtus communis l.	0.79
Cistus monspeliensis l. 3-6	0.78
Pinus pinea l. 4-6	0.78
Pistacia lentiscus l.	0.78
Olea europaea l.	0.77
Cistus monspeliensis l.	0.77
Ficus carica l.	0.76
Arbutus unedo l. 3-6	0.75
Quercus suber l. 4-6	0.75
Calycotome spinosa (l.) Link	0.75
Pinus halepensis mill. 4-6	0.74
Quercus suber l.	0.74
Juniperus phoenicea l. 3-6	0.74
Erica arborea l. 3-6	0.73
Cistus salviaefolius l. 3-6	0.73

Livrable L7

Juniperus oxycedrus l. Subsp. Oxycedrus	0.72
Quercus coccifera l. 4-6	0.72
Erica multiflora l.	0.72
Quercus coccifera l.	0.72
Pinus halepensis mill.	0.71
Erica multiflora l. 4-6	0.70
Fraxinus oxyphylla m. Bieb. Subsp. Oxycarpa willd.	0.70
Arbutus unedo l.	0.70
Cistus albidus l.	0.70
Cistus albidus l. 3-6	0.69
Cistus salviaefolius l.	0.69
Juniperus oxycedrus l. 2-6	0.68
Pistacia terebinthus l. 2-6	0.67
Erica arborea l.	0.67
Juniperus oxycedrus l.	0.66
Juniperus oxycedrus l. Subsp. Oxycedrus 2-3	0.65
Fraxinus ornus l.	0.65
Pistacia terebinthus l.	0.64
Juniperus phoenicea l.	0.64
Quercus ilex l. 4-6	0.64
Quercus ilex l.	0.62
Erica scoparia l. 4-6	0.62
Erica scoparia l.	0.60
Pinus pinaster soland.	0.58
Pinus pinaster soland. 4-6	0.58
Fraxinus oxyphylla m. Bieb.	0.57
Sorbus domestica l.	0.52

En gras ont été représentés les taxons qui ont été observés lors des prospections botaniques. Le modèle bioclimatique montre bien la probabilité de trouver les principaux taxons ligneux actuellement constitutifs des milieux prospectés. Ils montrent aussi la probabilité de trouver ou d'introduire des espèces à caractère thermoméditerranéen telles que le pin pignon, le caroubier, l'olivier, le figuier etc.

Pour 2050 (tableau 4), l'étude des probabilités de présence des milieux favorables des plantes sur la commune du Pradet montre une baisse significative de ces probabilités pour tous les taxons ligneux, ce qui témoigne d'une situation de stress potentiel à l'horizon 2050. Dans la partie nord de la commune, notons des probabilités de trouver les milieux favorables aux taxons suivants (en gras figurent les taxons observés lors des prospections botaniques) :

Tableau 4 : Liste des principales plantes ligneuses probables selon le scénario climatique de 2050 sur la commune du Pradet.

Taxons	Probabilités
Juniperus phoenicea l. 3-6	0.73
Pistacia lentiscus l. 3-6	0.72
Olea europaea l. Subsp. Silvestris miller	0.72
Myrtus communis l. 3-6	0.71

Olea europaea l.	0.71
Cistus monspeliensis l. 3-6	0.69
Cistus monspeliensis l.	0.69
Ficus carica l.	0.69
Pistacia lentiscus l.	0.69
Myrtus communis l.	0.68
Phillyrea angustifolia 2-6	0.68
Rhamnus alaternus l. 3-6	0.67
Lavandula stoechas l.	0.66
Fraxinus oxyphylla m. Bieb. Subsp. Oxycarpa willd.	0.66
Phillyrea angustifolia l.	0.66
Viburnum tinus l.	0.66
Cistus salviaefolius l. 3-6	0.65
Rhamnus alaternus l. 2-6	0.65
Pinus halepensis mill.	0.65
Lonicera implexa aiton 2-6	0.65
Lonicera implexa aiton	0.64
Rhamnus alaternus l.	0.64
Arbutus unedo l. 3-6	0.63
Quercus suber l.	0.63
Phillyrea latifolia (l.) Fliche	0.62
Phillyrea latifolia (l. 2-6	0.62
Erica arborea l. 3-6	0.62
Juniperus phoenicea l.	0.61
Cistus salviaefolius l.	0.60
Arbutus unedo l.	0.59
Quercus ilex l. 4-6	0.57
Erica arborea l.	0.56
Quercus ilex l.	0.55
Erica scoparia l. 4-6	0.55
Erica scoparia l.	0.51

Nous pouvons noter dans cette liste des probabilités supérieures à 50% de trouver des milieux favorables au chêne liège, au chêne vert et au pin d'Alep sur la commune du Pradet d'ici 2050. Néanmoins, compte-tenu des probabilités inférieures à 10% pour trouver des milieux favorables à ces taxons dans les sites prospectés, il est possible que ces taxons actuellement observés soient exposés à l'avenir à des situations de stress pouvant provoquer un dépérissement et une mortalité accrue. Ces résultats montrent aussi la persistance, voire le développement, du maquis à bruyère arborée et à arbousier, ce qui est un point à prendre en compte pour la gestion de ces milieux, en particulier pour les actions de préventions des incendies et la valorisation possible des rémanents vers la filière bois énergie.

3.3. Bois de Courbebaisse (Le Pradet, 83098)

Ce bois est situé en plein cœur de la ville. Il s'agit d'une pinède thermoméditerranéenne à pin d'Alep (*Pinus halepensis*) qui est relativement ancienne (environ 100 ans) et qui abrite notamment les espèces

suivantes en sous-bois : *Phillyrea angustifolia*, *Viburnum tinus*, *Asparagus acutifolius*, *Erica arborea*, *Cistus salviifolius* et *Lonicera implexa*. Des pieds de *Quercus suber*, *Quercus ilex* et de *Quercus pubescens* sont aussi présents dans cette pinède fermée. Ce type d'habitat est assez peu répandu en France et les surfaces sont de faibles dimensions. Ce type de milieu est assez sensible à la fréquentation touristique qui peut nuire à la dynamique végétale et être vectrice d'incendies.

En l'absence de pression anthropique trop intense et d'incendies, ce type de milieu peut se fermer et permettre aux chênes de se développer en sous-bois puis de se substituer aux pins dans les décennies futures. En cas de perturbations sur le milieu, ce type de formation à *Pinus halepensis* se reforme.

L'objectif actuel de gestion est d'ouvrir le milieu pour favoriser la régénération de jeunes pins d'Alep et des chênes. Dans ce cadre, des pins ont été coupés et des opérations de débroussaillage ont été programmées, notamment pour limiter la colonisation très dense du laurier tin. Le bois coupé est parfois utilisé pour des fascines ou simplement évacué en déchetterie par les services municipaux.

La liste des plantes discriminantes de ce relevé montre, à l'instar des résultats précédents, des taxons écologiquement discriminants observés dans ce relevé tels que *Pinus halepensis*, *Quercus ilex* et *Quercus lanuginosa*. L'indication de plantes non observées ayant un pouvoir discriminant assez élevé comme *Smilax aspera* (31%), *Pistacia lentiscus* (25%) souligne la nature xérophile à mésoxérophile et thermophile de ce bois fermé.

Compte-tenu des résultats relatifs à la probabilité de trouver des milieux favorables aux essences observées sur la commune du Pradet à l'horizon 2050, il est très probable que ce bois soit exposé à l'avenir à des situations de stress pouvant conduire à un dépérissement des ligneux.

4. Synthèse sur la dynamique des milieux prospectés

Cette synthèse est établie en prenant en compte les résultats des modèles socio-écologique et bioclimatique permettant de tracer les tendances évolutives des milieux prospectés à court et à moyen termes (2050).

4.1. Parcelles forestières de Camp Bourjas (Collobrières, 83043)

Les résultats issus du traitement socio-écologique des relevés floristiques et du modèle bioclimatique contribuent à expliquer les dynamiques actuelles et futures des milieux prospectés.

- Tendances évolutives actuelles et à court terme :
 - Dans les plantations à cèdre de l'Atlas et à pin maritime, les milieux prospectés montrent une fermeture du sous-bois par un cortège floristique appartenant au maquis. Cette fermeture est propice à la stabilisation des sols et à son développement, permettant ainsi l'apparition de conditions écologiques propices au développement des arbres. En particulier, le chêne vert pourrait avoir de l'avenir dans ces secteurs. En revanche, les coupes qui ont été pratiquées au cours de l'hiver 2019 vont avoir tendance à favoriser les taxons à croissance rapide tels que ceux constituant le sous-bois des parcelles plantées et probablement les pins.
 - Au niveau des suberaies, on assiste à une fermeture progressive des sous-bois pouvant eux-aussi constituer des milieux propices au développement d'autres essences telles que le chêne vert qui a une forte probabilité de présence aussi bien du point de vue socio-écologique que bioclimatique (>60% dans les deux modèles). Bien que le chêne liège ait une probabilité de présence assez importante dans ce secteur (70%) selon le

modèle bioclimatique, le modèle socio-écologique montre en revanche un faible pouvoir discriminant soulignant une possible compétition avec d'autres espèces locales.

- Tendances évolutives à moyen terme (2050) :
 - Le modèle bioclimatique indique de faibles probabilités de trouver les taxons observés dans les sites prospectés mais des probabilités plus importantes dans les secteurs situés au nord et en altitude de la commune. Ces résultats, qui sont en cohérence avec des conclusions avancées dans d'autres études, soulignent la possibilité pour les taxons ligneux d'être confrontés dans le futur à des situations de stress pouvant amener à une réduction de leur capacité à produire de la biomasse ou encore pouvant provoquer une mortalité accrue des individus. Ce scénario est en outre rendu possible par la multiplication attendue des périodes de sécheresse et par leur durée plus longue que par le passé.
 - Dans ce contexte il est probable que les arbres actuellement observés seront en compétition avec les taxons constitutifs du maquis. Dans ce cas, il serait possible d'observer une extension des maquis au détriment des bois et cette dynamique pourrait avoir des conséquences sur les points suivants :
 - Une réduction des massifs forestiers, réduisant ainsi les potentiels de valorisation du bois dans le secteur ;
 - Une augmentation du risque d'incendie en raison de la colonisation de buissons souvent impliqués dans ces phénomènes à risque.

Pour anticiper les éventuels impacts du changement climatique sur les écosystèmes constitutifs de Camp Bourjas, il serait utile de prévoir des activités de valorisation de l'entretien des maquis dans le but de réduire les risques d'incendie et de produire de la biomasse issues des ligneux constitutifs des maquis, en complément de la biomasse issue de l'entretien des arbres des espaces boisés. Cependant, ces prélèvements devront être limités dans l'espace dans le but d'éviter de porter atteinte à la couverture végétale et à la structure des sols qui, de leur côté, doivent contribuer à assurer la dynamique végétale des sites.

4.2. Massif de la Colle Noire (Le Pradet, 83098)

Le massif est en cours de fermeture grâce à la reprise post-incendie par des taxons constitutifs des maquis et par des chênes et des pins. La densité de végétation xérophile et thermophile contribue à la fois à favoriser le développement des ligneux mais également à poursuivre l'exposition de ce massif au risque d'incendie.

Les résultats du modèle bioclimatique pour 2050 montrent des très faibles probabilités de présence des taxons ligneux actuellement observés, soulignant là aussi un risque de réduction des zones boisées et de leur productivité à l'horizon 2050. La compétition avec les espèces constitutives du maquis et l'impact des périodes de canicule devraient avoir des conséquences néfastes sur la dynamique des arbres. En particulier, ces impacts devraient augmenter le risque d'incendie dans ce secteur déjà très

exposés. Les mesures de prévention et de protection des incendies de ce secteur qui sont actuellement en place devront vraisemblablement être renforcées à l'avenir.

4.3. Bois de Courbebaisse (Le Pradet, 83098)

Ce bois urbain sera également de plus en plus exposé au changement climatique. Sa localisation en centre-ville confère la possibilité d'être à proximité des systèmes d'irrigation pour le maintien de la végétation actuelle par exemple afin d'améliorer ou simplement de maintenir, surtout à l'avenir, le bilan hydrique de ce milieu.

Par ailleurs, ce milieu risque d'être encore plus exposé à l'avenir au risque d'incendie de forêt, ce qui est particulièrement préoccupant puisqu'il est situé en zone urbaine. Dans ce cas aussi, les mesures de prévention et de protection des incendies de ce secteur qui sont actuellement en place devront vraisemblablement être renforcées à l'avenir.

4.4. Synthèse des trajectoires évolutives

La figure 1 présente les principales trajectoires évolutives de l'ensemble des milieux prospectés en prenant en compte les résultats des approches socio-écologique et phytoclimatologique.

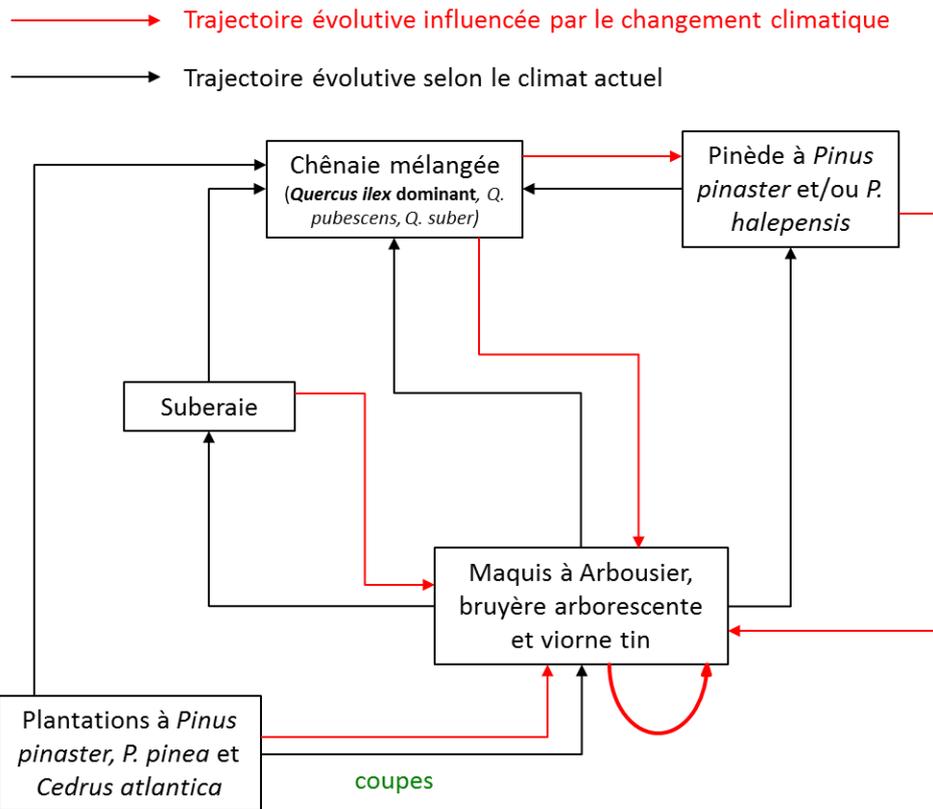


Figure 1 : Trajectoires évolutives des milieux selon les résultats socio-écologiques et phytoclimatologiques.

Ces trajectoires évolutives ne prennent pas en compte les traitements éventuels que les gestionnaires pourront mettre en œuvre (mis à part les coupes effectuées et prévues sur les plantations de conifères sur la commune de Collobrières), ni même les perturbations qui pourraient survenir comme l'occurrence d'incendies, de tempêtes ou de ravageurs.

Enfin, les résultats présentés ici complètent les travaux que nous avons publiés concernant l'impact potentiel du changement climatique sur les écosystèmes méditerranéens :

- Garbolino *et al.*, 2014, 2016 et 2017 : Ces travaux concernent la Corse et ont montré une extension possible des zones propices aux incendies de forêts dans les vallées internes et en altitude (260m environ) d'ici 2100. Ils ont montré aussi un possible remplacement des zones boisées par des ligneux bas de type maquis sur les zones les plus méditerranéennes et dans certaines zones de collines ;
- Garbolino *et al.*, 2017 : Ces travaux, réalisés dans les Alpes-Maritimes, montrent un possible déclin des populations d'arbres mésophiles au profit des espèces plus thermophiles, y compris des arbustes constituant les maquis, les garrigues et les landes d'altitudes, d'ici 2050. La modélisation de la dynamique urbaine au niveau du département permet, quant à elle, d'identifier les secteurs qui pourraient bénéficier du développement de la filière bois-énergie dès à présent et jusqu'à 2050 ;
- Garbolino *et al.*, 2019 : Cette recherche concerne les 15 départements méditerranéens sélectionnés par rapport à ceux pris en compte dans la base de données Prométhée (<http://www.promethee.com/>) qui recense les incendies et les départs de feux de ces départements depuis 1973. Elle montre déjà l'extension possible des surfaces qui seront

potentiellement exposées aux risques d'incendie d'ici à 2050 et les conséquences de ces risques sur le développement de la filière bois-énergie.

5. Quelles perspectives de gestion des milieux forestiers ?

Les travaux de modélisation présentés s'appliquent à la planification stratégique et à la planification tactique. La planification stratégique s'étend sur une à plusieurs décennies voire à un ou plusieurs siècles. Elle concerne les décisions d'investissements les plus importants car elle engage les parties prenantes sur une très longue durée. Le rôle actuel des méthodes et modèles d'aide à la décision de type prospectifs est de plus en plus utile pour ces aspects stratégiques. Cette planification n'est pas nécessairement obligée d'intégrer des éléments spatialement explicites : l'utilisation de statistiques générales montrant des tendances est souvent suffisante pour appuyer les décisions. Les résultats de la dynamique à moyen terme (2050) des milieux s'inscrivent dans cette perspective de gestion stratégique.

En revanche, les résultats relatifs à la dynamique à court terme s'inscrivent plutôt dans la gestion tactique des milieux car cette gestion s'applique sur quelques années (5 à 10 ans maximum). Ce niveau de planification nécessite d'avoir des informations très précises et spatialement explicites, tels que les relevés floristiques et leur traitement socio-écologique, pour établir les actions à mener en raison de son lien avec le niveau opérationnel.

Les informations issues des modèles utilisés au cours de notre étude pourraient ainsi être utilisées dans des PSG (Plan Simple de Gestion) qui ont un horizon temporel allant de 10 à 20 ans. Elles peuvent aussi servir de support de réflexion aux documents établis par l'ONF tels que la Directive et le Schéma Régional d'Aménagement PACA qui concernent la définition des objectifs d'usage du bois et de conservation des milieux. Ces documents d'orientation indiquent clairement l'intérêt de prendre en compte les effets du changement climatique dans la stratégie de gestion des massifs forestiers. Parmi les problématiques concernées par ces documents, celle du risque d'incendie de forêt et de son évolution future représente en enjeu prioritaire pour assurer la résilience de la forêt et de ses multiples usages.

5.1. Contexte actuel de gestion au niveau régional

En zone méditerranéenne de la Région Provence Alpes-Côte d'Azur, il est actuellement possible d'observer des peuplements de cèdres et de chênes lièges en massifs mélangés en zone littorale. L'ONF constate aussi la régénération des chênes pubescents sous les pins d'Alep et aussi chêne vert dans les zones de déprise rurale. Ils constituent des taillis qui sont entretenus avec des éclaircies et des actions de balivage dans les zones souvent fréquentées par le public. Les secteurs où se trouvent les chênes lièges sont souvent dans un état médiocre empêchant ou limitant leur exploitation pour la fabrication de bouchon (opérations de démasclage).

Le chêne liège connaît des difficultés pour se régénérer dans des milieux densément colonisés par d'autres espèces et exposés sur des adrets. Il se développe mieux sous le couvert du pin d'Alpe par exemple. Actuellement les actions de dépressage favorisent la croissance des arbres à croissance rapide comme les conifères. Ce point reste intéressant pour alimenter la filière bois-énergie par exemple. Il est toutefois important de porter attention aux risques pouvant peser sur la biodiversité des surfaces exploitées (risque de réduction de la biodiversité en cas d'activités intenses et d'érosion accrue des sols ou de tassement de ces derniers qui peuvent ralentir la dynamique de végétation). Ces

travaux sont préconisés par l'ONF sur les zones les plus facilement accessibles avec des engins et les zones les moins accessibles (fond de vallon et fortes pentes) sont laissées en l'état.

Les principales essences visées par des actions de gestion de l'ONF en zone de basse altitude sont le pin d'Alep, le pin pignon, le pin maritime, le pin sylvestre, le cèdre de l'Atlas, le cèdre du Liban, le chêne vert, le chêne liège, le chêne pubescent, le châtaignier et le hêtre. Pour les peuplements de feuillus les traitements préconisés selon les essences sont les suivants :

- Pour les chênes verts et pubescents : des éclaircies au sein des taillis permettent d'allonger les rotations des coupes et d'obtenir des individus de diamètre plus important. Des actions de balivage sont programmées pour obtenir une futaie lorsque les parcelles ont des individus de belle venue ;
- Pour les chênes liège : les suberaies sont souvent composées d'individus de petit diamètre avec un houppier incomplet en situation d'adret, ce qui nécessite de favoriser la gestion extensive de ce type de peuplement (très peu de travaux forestiers sont généralement prévus dans ce cas). Pour favoriser la régénération naturelle de cette essence, il est préconisé de réduire le maquis en sous-bois, ce qui permet aussi de limiter les risques d'incendies.

Pour les résineux, les peuplements sont le plus souvent gérés en futaies plus ou moins régulières en raison des besoins en lumière de ces espèces. Des actions de dépressage peuvent être conduites pour améliorer le développement en futaie des régénérations naturelles. En revanche, pour les peuplements les moins productifs, il est conseillé de limiter les éclaircies seulement aux meilleures classes de fertilité.

5.2. Perspectives de gestion au niveau locale

Les milieux prospectés sur les communes de Collobrières et du Pradet montrent une tendance actuelle à leur fermeture en sous-bois et par des essences telles que les pins et les chênes. Les sous-bois, issus des maquis, sont généralement très denses, permettant ainsi la stabilisation et l'amélioration de la structure des sols, ce qui favorise la dynamique végétale actuelle.

En revanche, les résultats en prospective végétale pour 2050 soulignent d'une façon générale pour ces deux communes une tendance au développement des maquis au détriment des écosystèmes forestiers actuellement en place ainsi que des risques :

- de diminution de la productivité des ligneux en place ;
- d'augmentation de leur taux de mortalité ;
- d'exposition accrue à l'aléa incendie.

Classiquement les maquis denses sont des structures de reconquête après abandon des activités rurales ou après incendie et ils permettent de stabiliser les sols du secteur. Cette densité de peuplement peut parfois nuire à la dynamique des chênes liège et des autres feuillus sclérophylles, ce qui peut nécessiter des travaux tels que des éclaircies et le débroussaillage pour favoriser la régénération ou le développement de nouveaux plants de chênes liège. En effet, on constate souvent une difficulté de régénération naturelle du chêne liège dans les zones de maquis dense et une possible substitution de cette essence par le chêne vert, le chêne pubescent, le laurier tin et l'arbousier. La conservation de ces peuplements à chêne liège a un intérêt écologique pour la réduction de la vulnérabilité des ligneux face aux incendies grâce à la régénération des individus après incendie, à condition que des épisodes de sécheresse ne viennent pas contrecarrer cette dynamique.

Il est possible que le changement climatique ait un impact sur la gestion durable des forêts dont les principes ont été introduits en 1993 par la Résolution H1 de la conférence d'Helsinki et déclinés en France en 1995. Est-ce que cela aura aussi des conséquences sur l'application des critères de certification PEFC (Pan European Forest Certification) des exploitations ? Cette certification est essentielle aujourd'hui pour assurer le développement de la filière bois-énergie sur le territoire au regard des exigences des industriels, des communes et des citoyens. Comment s'assurer que les pratiques mises en place actuellement seront encore bien adaptées aux conditions futures ? Selon Routa *et al.*, 2013, la gestion des espaces forestiers, en particulier à des fins énergétiques, doit prendre en compte les conditions environnementales du site et le type de génotype des espèces utilisées. C'est l'interaction entre ces trois éléments (gestion, génétique, environnement) qui permettent d'optimiser la production de biomasse.

Dans le contexte actuel où les espaces forestiers sont exposés à des changements pouvant impacter leur devenir (changement climatique, changement d'utilisation du sol), il ressort que la gestion de ces espaces doit aussi être suffisamment flexible pour favoriser l'adaptation des peuplements en parallèle de l'adaptation des modes de gestion. Pour aider à la prise en compte du changement climatique dans la définition des modes de gestion des forêts, Peterson *et al.* (2011) proposent la démarche suivante fondée sur 4 étapes :

- Etape 1 – Evaluer : Il s'agit d'analyser si le changement climatique a un effet sur le peuplement forestier et ce, selon l'intensité des phénomènes observés ;
- Etape 2 – Hiérarchiser : il s'agit de définir des priorités d'actions en prenant en compte plusieurs critères permettant d'assurer une gestion durable du peuplement selon les objectifs préalablement définis (usages du bois, conservation des sols, sanctuarisation des espaces naturels etc.) ;
- Etape 3 : Solutionner : cette étape concerne la définition précise des actions à mener selon le contexte local et les objectifs de gestion. Une attention particulière est donnée aux actions permettant de rendre résilient l'espace géré à partir des solutions d'adaptation au changement climatiques initialement définies ;
- Etape 4 – Observer : Il s'agit de définir des méthodes et des outils d'aide au suivi des conséquences des modes de gestion en relation avec les objectifs fixés. Les résultats de ces observations permettent ensuite de revenir sur les modes de gestion et de les adapter si nécessaire.

Au regard des impacts observés et potentiels du changement climatique sur les peuplements forestiers, il est très probable qu'il conviendra d'adapter, dans les prochaines décennies, le Plan de Développement de Massif (PDM) et le Plan d'Approvisionnement Territorial (PAT) de la filière bois en général, et plus particulièrement pour la filière bois-énergie dont l'activité est en développement dans le département du Var.

Compte-tenu des tendances estimées par le modèle bioclimatique, qui rejoignent des observations et des modélisations qui convergent aussi dans ce sens, la stratégie de gestion de ces milieux pourrait s'orienter vers les actions suivantes :

- Le développement des actions visant à favoriser le maintien, voire l'expansion des arbres, comme par exemple des actions de reboisement des espèces ayant *a priori* le plus d'avenir sur le secteur étudié (ex : chêne vert) ;
- La poursuite, voire le développement, des activités de valorisation des résidus ligneux provenant des activités d'entretien et de prélèvement de la biomasse arborée mais également adressée à la biomasse arbustive dans le but de réduire ponctuellement la densité de végétation propice aux incendies en zone forestière et dans les maquis. Des études ont montré la possible utilisation des résidus d'arbustes en filière bois-énergie (Todaro *et al.*, 2007 ; Gonzalez-Gonzalez *et al.*, 2017a et 2017b ; Galatsidas *et al.*, 2018) voire aussi pour la fabrication de pellets (Bados *et al.*, 2017). ;
- Le développement, dans la mesure du possible, d'activités agricoles dans les secteurs d'intérêt dans le but de favoriser l'entretien des espaces naturels et favoriser leur bilan hydrique (aménagement de canaux et de réservoirs) dans le but que ces aménagements et activités soient économiquement viables (en lien sans doute avec une co-activité touristique ou éducative par exemple). Le développement des activités dans les espaces forestiers et les maquis et garrigues tend à diminuer les risques d'incendies (Madrigal *et al.*, 2017). Ces activités tendent aussi à préserver les restanques tout en assurant un équilibre entre espaces cultivés et espaces boisés et arbustifs nécessaires à la durabilité des restanques (Stanchi *et al.*, 2012). La conservation des restanques permet à son tour de réduire les risques d'érosion des sols et limite le ruissellement, lui-même impliqué dans le processus d'inondation.

Suite à réunion de projet qui s'est tenue à Collobrières le 30 septembre 2019 et qui a rassemblé les principales parties prenantes du territoire étudié sur les questions relatives abordées par le projet ADAPT (voir la partie « *remerciements* » en début du rapport), les échanges ont permis de mettre en avant les points développés ci-après.

5.2.1. Le développement de l'agroforesterie

L'Association Française d'Agroforesterie définit l'agroforesterie comme étant l'ensemble des « *pratiques, nouvelles ou historiques, associant arbres, cultures et/ou animaux sur une même parcelle agricole, en bordure ou en plein champ. Ces pratiques comprennent les systèmes agro-sylvoicoles mais aussi sylvo-pastoraux, les pré-vergers (animaux pâturant sous des vergers de fruitiers)...* » Cette définition rejoint, au moins en partie, les études concernant les socio-écosystèmes ruraux dont l'économie est structurée en système agro-sylvo-pastoraux.

Actuellement la Maire de Collobrières s'intéresse à l'agroforesterie et soutient également son développement, notamment au travers d'un projet situé sur le Plateau Lambert. Collobrières vient d'adhérer au Syndicat National d'Agroforesterie avec un objectif d'améliorer la gestion de la forêt, surtout dans une perspective de changement climatique. Parmi les activités envisagées sur ce site, la commune souhaiterait mettre en œuvre des pratiques pour favoriser le développement du chêne liège, du chêne vert et du châtaignier, avec d'éventuelles plantations et greffages. Par ailleurs des activités arboricoles, culturales et d'élevage cohabiteront sur le site pour favoriser la durabilité de cette exploitation. L'objectif final étant de développer sur le site des activités pouvant générer des revenus assurant leur maintien ainsi qu'un haut niveau de qualité environnementale.

En effet, les perspectives qu'offre l'agroforesterie s'inscrivent dans une vision durable des activités rurales permettant de conserver, voire d'améliorer, le niveau local de biodiversité, de conserver les sols et leur fertilité, de diversifier la production des parcelles ou encore de stocker du carbone, tout en

permettant la génération de revenus sur la commune. Différentes filières peuvent ainsi devenir des débouchés pour valoriser les produits de ces activités, dont la filière bois d'œuvre et bois énergie. La gestion de l'eau est un point particulièrement important en zone méditerranéenne et le recours à l'agroforesterie peut améliorer le bilan hydrique des surfaces exploitées, de limiter l'érosion des sols et de contribuer à maintenir la qualité de l'eau en raison des fonctions de dépollutions des eaux réalisées par les systèmes racinaires des arbres. Enfin, des micro-ouvrages (bassins, canaux etc.) peuvent aussi être conçus pour améliorer le bilan hydrique des parcelles.

Le développement de l'agroforesterie peut ainsi apporter un moyen de rendre le territoire plus résilient face au changement climatique, en particulier pour favoriser le maintien des essences, préserver la biodiversité et conserver un bilan hydrique limitant l'exposition des parcelles aux incendies.

5.2.2. La gestion des forêts et la valorisation des arbres

Une des principales activités de gestion des forêts est la prévention et la lutte contre les incendies. Les travaux actuellement programmés consistent à des coupes, du débroussaillage et des éclaircies du maquis pour réduire la biomasse susceptible de participer à l'éclosion et à la progression des incendies. Les ligneux prélevés sont valorisés dans la filière bois-énergie. Au vu des résultats relatifs à l'impact potentiel du changement climatique sur le développement de l'exposition des massifs forestiers aux incendies, il est probable que ces activités devront être plus soutenues à l'avenir.

Les plantations qui ont actuellement une trentaine d'années commencent à être exploitées : des coupes d'amélioration ont été programmées et génèrent du bois pour la filière bois-énergie. D'ailleurs les nouveaux engins permettent de mobiliser du bois dans des secteurs relativement pentus. Cependant, assez peu de plantations sont programmées pour les futures années. Seulement 200.000 plants ont été introduits en région PACA depuis trois ans, ce qui est très faible compte-tenu de la surface du département. Ces plantations devraient elles aussi subir les effets du changement climatique sur leur physiologie, ce qui pourrait provoquer une réduction de leur productivité et peut-être une mortalité sur pied accrue d'ici 2050.

La certification du pin d'Alep comme bois d'œuvre (bois de charpente) en avril 2018 représente un intérêt pour valoriser économiquement ce bois et ainsi contribuer à assurer son suivi et la mise en place de procédures de gestion des peuplements.

Le développement du chêne vert est intéressant pour sa valorisation en bois-énergie et pour la préservation de la biodiversité sous son couvert.

Le dépérissement actuel du chêne liège pose un problème sur sa durabilité pour les prochaines décennies. Néanmoins, les actions actuelles visent à préserver ce ligneux sur le territoire de Collobrières en particulier pour les perspectives de valorisation du liège dans la filière construction pour des panneaux isolants. L'Association Syndicale Libre de Gestion Forestière de la Suberaie Varoise (ASL Suberaie Varoise) et les sites Natura 2000 procèdent à quelques travaux pour développer la suberaie, notamment en ouvrant certaines zones de maquis pour favoriser la régénération et la croissance du chêne liège. Il conviendra de suivre ces travaux dans le but d'évaluer l'efficacité de ces mesures pour le développement du chêne liège.

5.2.3. La gestion des maquis et les potentiels débouchés

Les sous-bois actuellement étudiés sont principalement structurés par des espèces constitutives des maquis telles que le lentisque, l'arbousier, le viorne tin etc. Les quelques éclaircies réalisées et les

débroussaillages aux abords des massifs n'apportent pas de valeur ajoutée. Ils permettent avant tout de limiter l'exposition de ces massifs à l'éclosion d'incendies. Une possibilité d'exploitation serait le développement du pâturage mais ce dernier est très réglementé en raison des risques de surpâturage et ses conséquences sur l'érosion et la dégradation des sols, voire sur la réduction de biodiversité.

Pour l'instant il est encore difficile de développer une économie fondée sur la fabrication de pellets à partir de biomasse issue des maquis. Mais les travaux conduits en Espagne et en Italie restent toutefois à étudier pour évaluer leur transposition sur le territoire français et la faisabilité d'une activité industrielle.

Enfin, il existe aujourd'hui des expériences pour développer des activités de valorisation des plantes aromatiques, de production de miel d'arbousier et de bière à arboises, d'huiles essentielles à partir des espèces végétales constitutives des maquis. Mais ces initiatives restent encore expérimentales et les débouchés économiques sont encore très faibles : ce sont des activités de niche encore trop limitées pour envisager à court terme une réelle filière.

6. Quels impacts potentiels de la gestion des milieux forestiers sur le ruissellement ?

La couverture végétale joue un rôle important pour la protection des sols lors des intempéries, en particulier en région méditerranéenne compte-tenu du régime fréquemment orageux des précipitations. La couverture végétale permet ainsi de réduire les risques d'érosion des sols et de glissement de terrain superficiel (Stokes *et al.*, 2008 ; Vergani *et al.*, 2017) ainsi que les risques d'inondation (Anderson *et al.*, 2006 ; Croke *et al.*, 2017).

Nous proposons dans cette partie une étude sur l'impact des modes de gestion forestière, en particulier des modes de prélèvement des arbres, sur le ruissellement pluvieux dans le secteur d'étude de la commune de Collobrières. La modélisation repose sur le modèle Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), un modèle disponible en accès libre et qui est en développement et évolution depuis la fin des années 1980 sous la responsabilité du corps des ingénieurs de l'armée américaine.

Deux scénarios de gestion des coupes forestières ont été utilisés pour évaluer leur effet sur le ruissellement :

1. La réalisation de coupes sur un versant respectant un cloisonnement permettant de limiter l'ouverture du milieu forestier et utilisant des rémanents au sol pour limiter le tassement et le ruissellement ;
2. La réalisation de coupes à blanc sur un versant : ce type de pratique n'est absolument pas préconisé par l'ONF et les acteurs de la filière bois en zone méditerranéenne sur les versants. Mais force est de constater qu'il arrive que des coupes de ce type aient été organisées dans la région d'étude par des opérateurs peu scrupuleux quant aux recommandations de l'ONF. Ce type de situation relative à une coupe à blanc est aussi à mettre en perspective avec l'état de la couverture végétale à la suite d'un incendie de forêt particulièrement sévère.

6.1 La Coupe forestière :

La coupe forestière sur Collobrières est décrite dans 3 documents de l'ONF :

- 1) C. Cabasse, Projet ADAPT - Commune de Collobrières. Note pour validation de la méthodologie d'exploitation proposée, ONF, 25/01/2019.

- 2) C. Cabasse, Bilan de la coupe ADAPT, commune de Collobrières, Office national des forêts – Bureau d’Etudes Côte d’Azur, avril 2019.
- 3) C. Cabasse, Bilan de la coupe ADAPT, commune de Collobrières, Office national des forêts – Bureau d’Etudes Côte d’Azur, avril 2019.

Le secteur soumis à la coupe forestière est présentée dans la Figure 6.1. Puisque les conditions de la coupe sont détaillées dans les rapports de C. Cabasse cités ci-dessus, seul un descriptif sommaire est proposé ici. La coupe a eu lieu du 11 au 15 février 2019 sur une superficie de 1.3 ha. Des précautions pour limitées les impacts post-coupes sur le ruissellement ont été mises en place pendant le chantier : 6 cloisonnements, 3 collecteurs de vidange pour le ruissellement potentiel, l’utilisation de pneus à basse pression, l’épandage de rémanents sur les cloisonnements et collecteurs de vidange, par endroits des troncs ont été déposés en chevron dans les cloisons avec ou sans rémanents en renfort, et enfin la préservation d’un rideau d’arbres en bordure du ruisseau. Le volume total de bois prélevé était de 125 m³, et le volume non-récolté à cause des mesures de lutte contre le ruissellement et l’érosion des sols post-coupe était de 15 m³, soit 12% du volume récolté.

6.2 Analyse de sols

Lors de la première sortie de terrain (mars 2018) sur le site pilote de Collobrières, 16 sites ont été sélectionnés pour le prélèvement d’échantillons de sol pour analyse texturale dans la zone et en proximité de la zone de coupe. Pour chaque site, un descriptif de la végétation (E. Garbolino), de l’orientation, de l’inclinaison de pente ainsi que de l’épaisseur du sol a été noté. Sur chaque site, un échantillon de surface (0-20 cm) a été prélevé. Là où le sol le permettait, un échantillon en profondeur, dont la profondeur a varié avec l’épaisseur du sol, a été prélevé également. En total, 26 échantillons ont été envoyés pour analyse texturale.

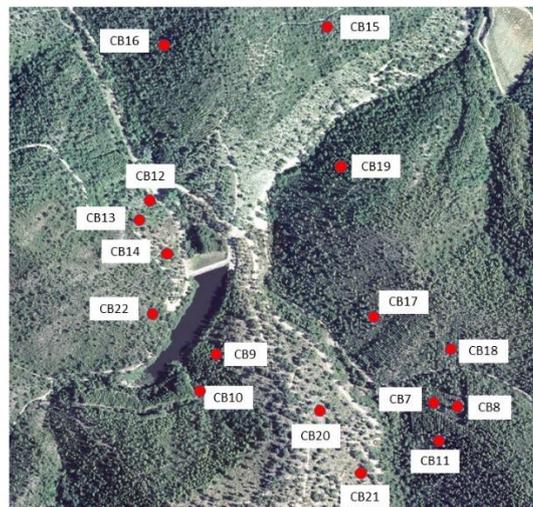


Figure 6.4 : Localisation des échantillons de sols. Les échantillons CB7, CB8, et CB11 sont dans le périmètre de la coupe forestière.

Afin de mieux définir les caractéristiques du sol, 2 catégories ont été cartographiées sur l’ensemble des 2 bassins-versants (Fé & Meyffrey) à l’aide d’orthophotographies aériennes datant de 2014. Ce découpage assez simple qui relevait des différences de densité de couvert végétale a ensuite été examiné en relation avec les profondeurs et textures du sol dans la zone d’échantillonnage.

6.3 Le contexte hydrologique :

Le site pilote est situé dans le périmètre du bassin-versant expérimental du Réal-Collobrier de l'IRSTEA, dont le suivi hydrologique date de plus de 50 ans (Folton et al., 2012). Dans le cadre du projet ADAPT, 2 stations hydrométriques ont pu être installées en février 2019. L'une est située sur le vallon de Meyffrey (Figure 6.1). Cette station vient en remplacement d'une station installée en 1985 et emportée par une crue en janvier 2014. ; il existe donc sur ce vallon une longue série de mesures, interrompues entre 2014 et 2019. L'autre station est sur le vallon de Fé (à l'ouest du Meyffrey ; Figure 6.2) juste en aval de la coupe forestière. Le premier bilan hydrologique effectué par l'IRSTEA date de mai 2019 (Folton et Tolsa, 2019) et arrive trop tôt après l'installation des stations et la coupe (un seul événement important en mai) alors il était impossible d'estimer l'impact de la coupe sur le ruissellement. Depuis, le département du Var a connu des événements extrêmes en novembre et décembre 2019. Ces événements arrivent trop tardivement pour être pris en compte dans ce rapport. Il serait, néanmoins, utile de reprendre ces événements dans l'analyse des mesures hydrologiques (si les stations ont survécu) puis de la modélisation afin de mieux caler le modèle HEC-HMS et quantifier l'impact potentiel de coupes forestières sur le ruissellement.



Figure 6.1 : Station hydrométrique sur le vallon de Meyffrey (Photo D. Fox).



Figure 6.2 : Station hydrométrique sur le vallon de Fé (Photo D. Fox).

6.4 La modélisation hydrologique :

La modélisation hydrologique se fait en deux temps : un premier pré-traitement des données dans un module « plugin » de ArcGIS qui s'appelle geoHMS, suivi de la modélisation hydrologique dans HEC-HMS. Le module geoHMS (Figure 6.3) est un modèle semi-distribué qui découpe le bassin-versant en sous-bassins versants afin de pouvoir déterminer les paramètres hydrologiques à une échelle plus fine que le bassin-versant entier. Ce découpage se fait à l'aide d'un MNT et est donc défini par les caractéristiques topographiques du bassin-versant.

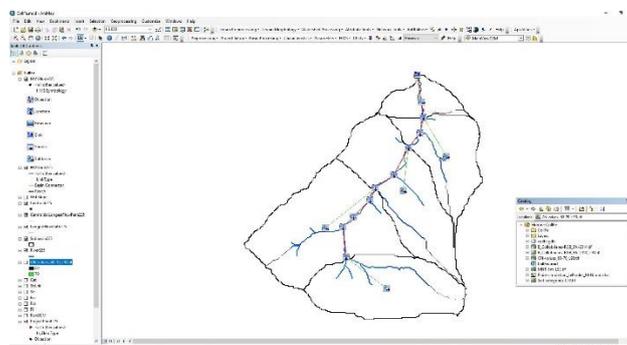


Figure 6.3 : Exemple d'interface du modèle HEC-HMS (<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>)

Le module permet aussi d'extraire automatiquement les paramètres hydrologiques à l'échelle des sous-bassins versants. De nombreuses options de modélisation sont possibles dans HEC-HMS, alors seulement ceux utilisés dans cette étude seront décrites.

« **Soil Loss Method** » : dans ce modèle, « soil loss » est tout ce qui ne ruisselle pas et intègre surtout l'absorption initiale de la pluie avant ruissellement et le taux d'infiltration pendant l'événement. Dans le cas de cette étude, la méthode du Soil Conservation Service (SCS) – Curve Number (CN) a été utilisée. Cette méthode est une forme de coefficient de ruissellement où la valeur du CN varie avec l'occupation du sol et les caractéristiques du sol (Chow et al., 1988).

« **Transform Method** » : cette option sélectionne l'hydrogramme de crue à utiliser pour simuler les courbes montantes et descendantes de débit. La méthode du Soil Conservation Service est l'option préférée si le SCS-CN a été choisi pour estimer le ruissellement. La valeur par défaut du « Peak Rate Factor » est de 484, mais elle a été augmentée à 500 dans les simulations afin de mieux refléter les pentes relativement fortes du secteur.

« **Baseflow method** » : cette option définit l'écoulement qui alimente le cours d'eau provenant de la nappe phréatique ainsi que des eaux d'écoulement hypodermique qui resurgissent du sol après infiltration. Dans notre cas, le « Recession method » a été utilisé avec un « threshold value » de $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et un coefficient de régression de 0.3.

« **Storm hyetograph** » : en attendant de pouvoir éventuellement reproduire les éléments des dernières semaines de 2019, la même hyétogramme de pluie que pour les simulations sur le site pilote du Pradet (période de retour de 10) a été utilisée (Annexe 1).

HEC-HMS découpe de bassin-versant en sous-bassins versants selon des critères topographiques. L'utilisateur a ensuite l'option de regrouper des sous-bassins versants ensemble afin de simplifier la configuration, d'harmoniser le découpage, puis d'éliminer des sous-bassins versants trop petits avec des temps de réponses très courts et difficiles à estimer. Après ce découpage, l'utilisateur entre un fichier raster au format tif avec les valeurs de CN spatialisées en fonction de l'occupation du sol et des caractéristiques du sol. Le modèle extrait automatiquement la moyenne pondérée du CN pour chaque sous-bassin versant. Il détermine également le temps de réponse en fonction des caractéristiques topographiques et d'occupation du sol (taille, inclinaison de pente, valeurs de CN).

En tout, 3 simulations hydrologiques ont été effectuées, toutes sur le vallon du Fé, car les différences en couvert végétal entre avant et après coupe sont les plus fortes et la superficie exploitée est légèrement plus importante (de l'ordre de 0.7 ha). Les ordres de grandeur seront donc les mêmes ou moins importantes pour le Meffrey. Les simulations étaient donc les suivantes : 1) ruissellement avant coupe ; 2) ruissellement après coupe réelle de l'ONF ; 3) ruissellement après scénario de coupe à blanc.

7. Résultats des modélisations hydrologiques ?

Les résultats seront présentés dans l'ordre suivant : état de surface post-coupe, analyses de sols, modélisations hydrologiques.

7.1 Visite de terrain post-coupe :

Comme il a été noté ci-dessus, la coupe a eu lieu en février 2019 et le site a été visité par D. Fox et E. Garbolino le 9/07/2019 puis de nouveau le 30/09/2019. Le rapport du mois de mai 2019 de l'IRSTEA

(Folton et Tolsa, 2019) avait relevé le fait qu'il y avait eu peu de pluie entre la coupe et la date du rapport. En effet, le printemps et l'été 2019 ont été plus secs que la norme (communication personnelle de N. Martin, climatologue de l'UNS). La tendance s'est fortement inversée en automne 2019 mais l'intégration des données de pluies et débits des dernières semaines n'aurait pas permis de rendre ce rapport dans les délais fixés par la convention avec le département du Var. Un avenant à cette convention permettrait de faire l'analyse sur cette saison particulièrement pluvieuse en partenariat avec l'IRSTEA s'ils le souhaitent.

Les photos de la Figure 7.1 montrent l'état de surface dans les zones de coupe. Les photos sont conformes aux descriptions fournies dans les rapports de C. Cabasse cités ci-dessus. Les rémanents épandus à la surface forment un « mulch » qui protège les sédiments du sol de l'impact des gouttes de pluie et favorisent l'infiltration. Par endroit, ce couvert n'est pas assuré à 100% mais les zones non-couvertes sont petites avec une faible connectivité spatiale d'une surface dénudée à l'autre. Des branchages plus grossiers, ainsi que des troncs, ont été disposés afin d'assurer que tout ruissellement généré par la coupe ne se concentre pas sur de longues distances et qu'il ne prenne pas de vitesse. Lors de la visite, nous n'avons trouvé aucune trace de rigoles ou d'érosion qui indiquerait un ruissellement concentré ou érosion aggravée. Encore une fois, les fortes pluies sont survenues plus tard dans l'année et une visite de terrain début 2020 permettrait d'estimer l'impact de la coupe et des mesures de protection avec une meilleure pertinence.



Figure 7.1 : Photos de l'état de surface quelques mois après la coupe (Photos D. Fox).

7.2 Analyse du sol :

La Figure 7.2 montre une orthophoto de 2014 avec les réseaux hydrologiques du Fé et du Meyffrey, les contours des bassins-versants, puis la limite approximative de la zone de coupe reportée du rapport du bilan de la coupe de C. Cabasse. La zone dénudée à l'est et au sud-est de l'étang correspond à une coupe de pare-feu le long de la piste. Dans ce cas, le couvert végétal reflète en partie l'épaisseur du sol mais aussi les travaux de coupe dont l'objectif est de réduire le combustible en cas d'incendie de

forêt. L'orthophoto a néanmoins été utilisée pour estimer les épaisseurs du sol dans les bassins versants (Figure 7.3). L'épaisseur du sol varie en fonction de l'inclinaison de la pente, l'orientation de la pente, la position sur le versant (amont-aval) puis la forme générale du versant (convexités-concavités horizontaux et verticaux). Une cartographie détaillée de ces facteurs était impossible, et même inutile, dans le cadre de ce projet alors la carte est indicative pour faciliter la modélisation du ruissellement.

Le Tableau 7.1 montre la profondeur du sol pour chacun des sites de prélèvement indiqués dans la Figure 6.4. Les moyenne et médiane pour les sols plutôt épais sont de 52.1 cm et 35.0 cm, respectivement ; les valeurs pour les sols plutôt maigres sont de 33.3 et 30.0 cm, respectivement. Il existe donc une petite différence dans l'épaisseur des sols pour les deux catégories, même si cette différence n'est pas statistiquement significative à cause de forts écarts-types dans les valeurs (34.4 cm pour Epais, 18.2 pour Maigres).

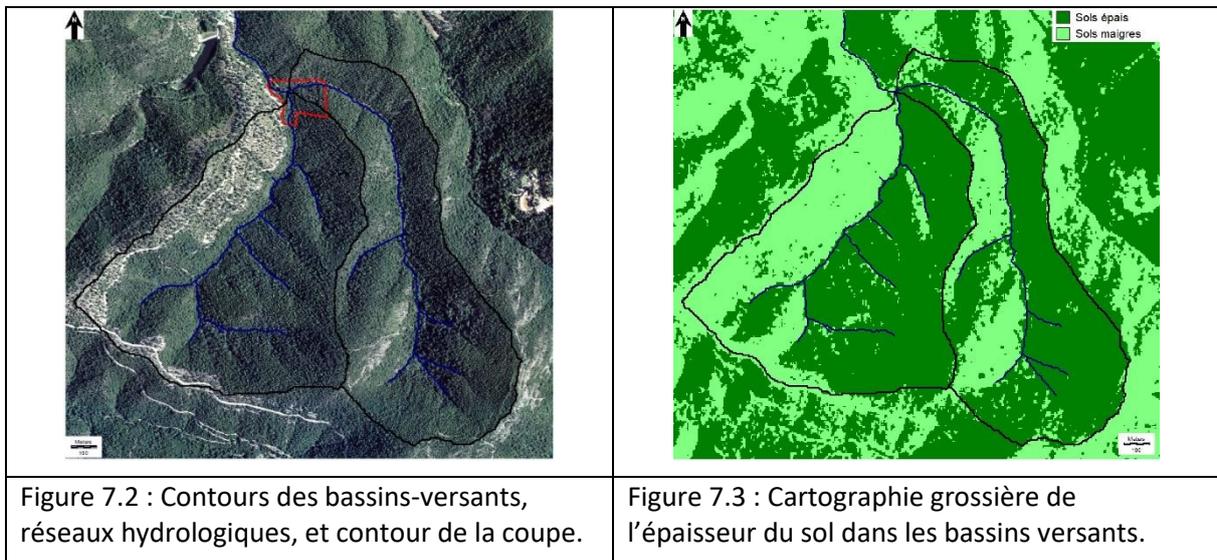


Tableau 7.1 : Epaisseurs des sols pour les différents sites de prélèvement.

No.	Code	Epaisseur (cm)	Catégorie Sol
2	CB7	35	Epais
3	CB8	15	Epais
4	CB9	35	Epais
5	CB10	65	Epais
6	CB11	60	Epais
7	CB12	45	Maigre
8	CB13	20	Maigre
9	CB14	25	Maigre
10	CB15	30	Maigre
11	CB16	15	Maigre
12	CB17	120	Epais
13	CB18	20	Maigre
14	CB19	35	Epais
15	CB20	75	Maigre
16	CB21	35	Maigre
17	CB22	35	Maigre

Les résultats des analyses texturales sont présentés dans le Tableau 7.2 et résumés dans le tableau 7.3. La teneur en Sable, et plus particulièrement en Sable Grossier, est la plus importante pour tous les échantillons, suivie de la fraction limoneuse. Aucun des échantillons ne dépassent les 15% d'Argile. Nous sommes donc en présence de sol à texture grossière avec une forte porosité en surface mais qui, dans l'ensemble, sont peu profonds (30 à 50 cm environ). Ceci suggère que la capacité d'infiltration est forte en début de pluie mais qu'elle chute brutalement lorsque le sol est saturé et que la conductivité hydraulique de la roche mère détermine le taux d'infiltration. Cette baisse dans le taux d'infiltration se produirait plus rapidement dans la catégorie des sols Maigres que dans les sols Epais. Ceci justifie donc l'utilisation d'une valeur de coefficient de ruissellement, ou de CN dans notre cas, plus élevé pour la première catégorie. Le pH est acide avec des valeurs entre 5 et 6 pour tous les échantillons à l'exception d'une valeur de 4.7. La forte teneur en Sable Grossier, la faible teneur en Argile, le pH acide et la faible épaisseur du sol sont des caractéristiques typiques de sols formés sur des substrats cristallins métamorphiques.

Tableau 7.2 : Analyses de sols pour chacun des 26 échantillons. Toutes les valeurs sont en pourcentages (sauf pH).

No.	Prof	Code	A	LF	LG	L	SF	SG	S	pH	C	MO
2.1	Surf.	CB7	5.6	12	9.1	21.1	28.5	44.8	73.3	5.6	1.36	2.36
2.2	Prof.	CB7bis	7.4	14.7	11.7	26.4	32.5	33.6	66.1	6.0	0.92	1.6
3	Surf.	CB8	4.2	8.7	11.6	20.3	23.7	51.8	75.5	5.5	1.6	2.76
4	Surf.	CB9	4.9	12	9.8	21.8	29.9	43.4	73.3	5.3	1.56	2.69
4.1	Prof.	CB9bis	7.2	12.6	11.1	23.7	26.8	42.3	69.1	5.2	0.99	1.71
5.1	Surf.	CB10	19	17.6	15.6	33.2	18.3	30.1	48.4	6.6	0.94	1.63

5.2	Prof.	CB10 bis	23.6	20.8	18.1	38.9	16.7	20.8	37.5	5.9	0.45	0.78
6.1	Surf.	CB11	6.7	9.0	9.4	18.4	17.7	57.2	74.9	5.3	0.98	1.7
6.2	Prof.	CB11 bis	7.2	12.8	12.9	25.7	26.0	41.1	67.1	5.0	0.39	0.67
7.1	Surf.	CB12	14.1	18.5	13.7	32.2	27.6	26.1	53.7	6.1	2.04	3.53
7.2	Prof.	CB12 bis	20.8	18.5	14.2	32.7	21.9	24.6	46.5	6.0	0.5	0.87
8	Surf.	CB13	10.6	18.4	10.1	28.5	30.4	30.5	60.9	5.2	2.31	3.99
9	Surf.	CB14	14.3	27.9	9.8	37.7	15.5	32.5	48	5.9	3.41	5.9
10	Surf.	CB15	7.7	14	10.9	24.9	18.8	48.7	67.5	5.5	1.59	2.74
11	Surf.	CB16	11.9	18.8	9.6	28.4	23.7	36	59.7	6.1	4.54	7.85
12.1	Surf.	CB17 _1-1	10.1	12.9	10.2	23.1	27.7	39.1	66.8	6.3	2.3	3.98
12.2	Prof.	CB17 _1-1bis	6.8	14	19.5	33.5	29.8	29.8	59.6	6.0	0.52	0.91
13	Surf.	CB18	5.5	9.1	9.9	19	26.7	48.7	75.4	5.5	1.54	2.67
14.1	Surf.	CB19 _3-1	6.8	13.1	10.6	23.7	26.1	43.4	69.5	5.8	2.75	4.75
14.2	Prof.	CB19 _3-1bis	5.1	11.6	10.5	22.1	32.2	40.5	72.7	5.9	0.90	1.57
15.1	Surf.	CB20 _4-1	14.4	17.8	11.3	29.1	21.0	35.5	56.5	6.3	2.77	4.79
15.2	Prof.	CB20 _4-1bis	4.8	9.0	10.8	19.8	20.7	54.8	75.5	6.5	0.35	0.6
16.1	Surf.	CB21 _5-1	12.8	15.7	10.8	26.5	25.2	35.5	60.7	6.1	1.38	2.39
16.2	Prof.	CB21 _5-1bis	13.6	15.7	7.5	23.2	22.8	40.4	63.2	5.8	0.76	1.31
17.1	Surf.	CB22 _6-1	7.2	16	9.2	25.2	21.4	46.3	67.7	4.7	2.22	3.84
17.2	Prof.	CB22 _6-1bis	6.0	10.7	11.2	21.9	25	47.1	72.1	5.6	0.76	1.31

(A=Argile ; LF=Limon Fin; LG=Limon Grossier ; L=Limon total ; SF=Sable Fin ; SG=Sable Grossier ; S=Sable total ; pH=pH eau ; C=Carbone ; MO=Matières Organiques).

Le bilan des analyses de sols présenté dans le Tableau 7.3 montre un taux d'argile légèrement supérieur en profondeur à l'intérieur de chaque catégorie. Cette tendance, cependant, n'est pas statistiquement significative. Le taux d'Argile semble légèrement plus élevé pour les sols maigres que pour les sols épais, mais cette différence aussi n'est pas statistiquement significative. Les différences en taux de Matières Organiques entre les catégories de sols sont contraires aux attentes (et au bon sens) et représentent sûrement l'effet de quelques valeurs très fortes dans les sols maigres dues à l'intégration dans l'échantillon de quelques feuilles ou Matières Organiques partiellement décomposées en surface de sol. Au contraire, les tendances plus faibles en profondeur sont cohérentes avec nos attentes et représentent la seule tendance statistiquement significative.

Tableau 7.3 : Bilan des analyses de sols. Toutes les valeurs sont en pourcentages (sauf le pH).

Profondeur	Catégorie	Argile	Limon	Sable	pH	M.O.
Surface	Epais	8.2	23.1	68.8	5.8	2.8
Surface	Maigre	10.9	27.9	61.1	5.7	4.2
Profond	Epais	9.6	28.4	62.0	5.7	1.2
Profond	Maigre	11.3	24.4	64.3	6.0	1.0

7.3 La modélisation hydrologique :

Afin de simuler l'hydrogramme de crue de chaque bassin versant, il était nécessaire de déterminer les valeurs de CN à utiliser pour le calcul du ruissellement. Ces valeurs dépendent de l'occupation du sol puis du groupe hydrologique du sol (USDA TR-55, 1986). Les analyses de sol placent les sols des bassins versants à la limite entre les sols des Groupes B et C (A=sols les plus perméables ; D=sols les moins perméables). Les valeurs de CN pour une forêt à faible couvert végétal sont variées de 66 à 77 et pour une forêt à fort couvert végétal de 55 à 70 (Tableau 7.4). Pour nos simulations, la valeur de 70 a été sélectionnée pour la catégorie de sol Maigre, puis de 60 pour la catégorie de sol Epais.

Tableau 7.4 : Valeurs de CN pour différentes occupations du sol et groupes hydrologiques (extrait de Chow et al., 1988).

TABLE 5.5.2
Runoff curve numbers for selected agricultural, suburban, and urban land uses (antecedent moisture condition II, $I_a = 0.25$)

Land Use Description	Hydrologic Soil Group			
	A	B	C	D
Cultivated land ¹ : without conservation treatment	72	81	88	91
with conservation treatment	62	71	78	81
Pasture or range land: poor condition	68	79	86	89
good condition	39	61	74	80
Meadow: good condition	30	58	71	78
Wood or forest land: thin stand, poor cover, no mulch	45	66	77	83
good cover ²	25	55	70	77
Open Spaces, lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.				
good condition: grass cover on 75% or more of the area	39	61	74	80
fair condition: grass cover on 50% to 75% of the area	49	69	79	84
Commercial and business areas (85% impervious)	89	92	94	95
Industrial districts (72% impervious)	81	88	91	93
Residential ³ :				
Average lot size	Average % impervious ⁴			
1/8 acre or less	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. ⁵	98	98	98	98
Streets and roads:				
paved with curbs and storm sewers ⁵	98	98	98	98
gravel	76	85	89	91
dirt	72	82	87	89

La Figure 7.4 montre le découpage du bassin versant du Fé après consolidation des sous-bassins versants dans geoHMS. La coupe forestière a eu lieu au sein du sous-bassin versant W340, c'est donc le seul pour lequel la valeur du CN évolue entre les 3 simulations puisque rien ne change dans les autres sous-bassins versants. Le Tableau 7.5 résume les valeurs par sous-bassin versant. La superficie du sous-bassin versant concerné par la coupe a été préservée à sa valeur minimale afin de mieux estimer l'impact du ruissellement, mais puisque la superficie de la coupe est relativement petite (0.7 ha), la surface du sous-bassin versant altérée ne représente que 13.0% du sous-bassin versant. L'inclinaison de pente est homogène entre les sous-bassins versants et le temps de réponse varie surtout avec la superficie du sous-bassin versant. La zone de coupe avait une valeur de CN avant coupe de 60 (sol épais), et cette valeur a été estimée à 66 après la coupe ONF, puis à 80 pour une coupe à blanc. Les valeurs de CN dans le tableau 7.5 indiquent donc la moyenne pondérée du CN avant la coupe (moyenne pondérée des valeurs de CN de sols Maigres et Epais), après la coupe-ONF, et enfin après une coupe à blanc.

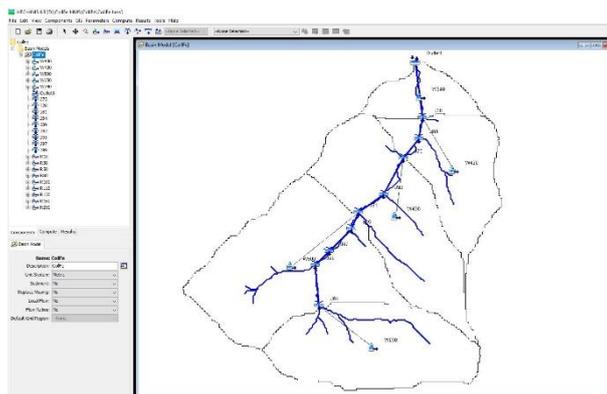


Figure 7.4 : Intégration des résultats de pré-traitements dans geoHMS dans HEC-HMS.

Tableau 7.5 : Valeurs des paramètres topographiques et hydrologiques utilisées dans le modèle HEC-HMS.

Sous-Bassin Versant	Superficie (ha)	Inclinaison Pente (%)	Réponse (min.)	CN-Avant coupe	CN-ONF	CN-Blanc
W340	5.35	34.1	7.02	64.5	64.8	66.6
W420	12.56	34.0	10.74	61.7	61.7	61.7
W430	20.14	35.4	12.72	63.8	63.8	63.8
W500	25.88	35.9	10.50	66.1	66.1	66.1
W650	18.72	36.1	10.08	61.9	61.9	61.9

Les résultats des simulations hydrologiques indiquent qu’à l’échelle du bassin versant du Fé, la coupe forestière n’a aucun impact sur le pic de débit (valeurs extraites de la Figure 7.5a-c), que la coupe soit celle qui intègre les mesures de protection mises en place par l’ONF ou une coupe à blanc (Tableau 7.6). Ceci n’est pas surprenant puisque la superficie de la coupe par rapport à la surface du bassin versant est négligeable. Il y a, néanmoins, une petite augmentation de la lame d’eau ruisselée (et du coefficient de ruissellement) pour la coupe à blanc, même à l’échelle du bassin versant (de 63.5 à 66.2 $m^3 s^{-1}$; soit une augmentation de 4.3%). Ceci indique que pour des coupes plus importantes, cette technique pourrait avoir un impact significatif sur le ruissellement.

A l’échelle du sous-bassin versant (W340), les pics de débit restent constants pour les simulations avant et après-ONF à $0.6 m^3 s^{-1}$ et augmente légèrement pour la coupe à blanc de 0.60 à $0.7 m^3 s^{-1}$ (une augmentation de 16.7%). Gardons à l’esprit que la superficie de la coupe ne représente que 13.1% du sous-bassin versant W340. L’échelle de parcelle de la coupe est trop petite pour simulée avec HEC-HMS, mais quelques indications peuvent être données déjà à partir des résultats présentés ici. Il est très probable que la coupe effectuée par l’ONF garde un couvert végétal, soit par des végétaux non-prélevés, soit par un mulch, qui protège la surface du sol et permet de maintenir un bon taux d’infiltration. Les impacts sur le ruissellement sont probablement très faible mais ceci nécessiterait une visite de terrain début 2020 afin de vérifier l’état de la surface après les pluies exceptionnelles de fin 2019. Une coupe à blanc théorique aurait un impact local certainement très fort sur le ruissellement car déjà son effet se fait ressentir à l’échelle du sous-bassin versant avec une augmentation du pic de débit de 16.7%, quand la coupe ne représenterait que 13.1% du sous bassin versant. L’impact sur l’érosion des sols serait certainement encore plus important car les sédiments sont composés surtout de fractions non-argileuses avec une très faible cohésion. Nous pourrions donc nous attendre à une formation importante de rigoles sur la parcelle et une augmentation de la charge sédimentaire dans le Fé très importante.

Tableau 7.6 : Résultats des simulations hydrologiques.

	Avant	Après-ONF	Après-Blanc
Pic de débit ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	8.0	8.0	8.0
Lame ruisselée (mm)	63.5	63.9	66.2
Coefficient de Ruissellement	48.71	49.01	50.81

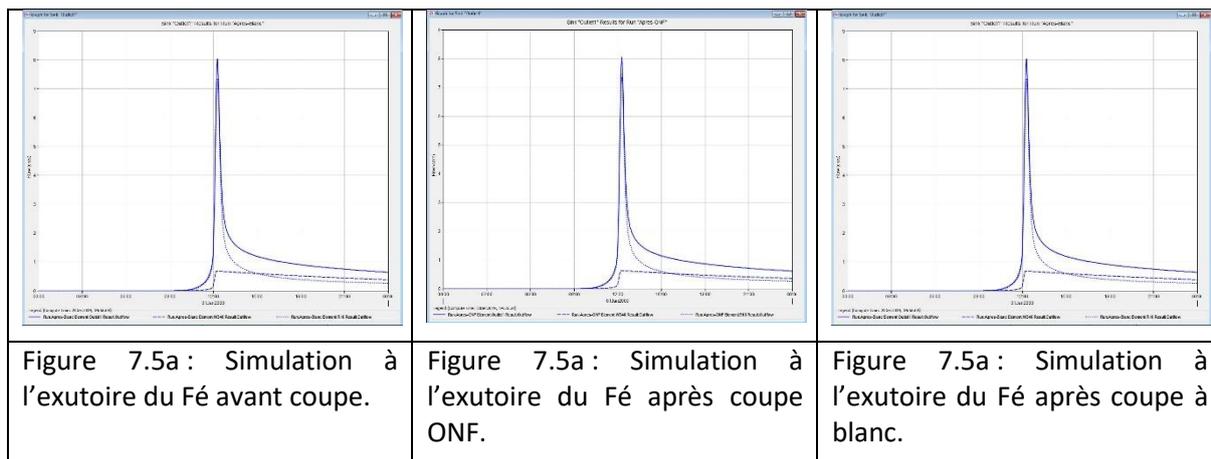


Figure 7.5a : Simulation à l'exutoire du Fé avant coupe.

Figure 7.5a : Simulation à l'exutoire du Fé après coupe ONF.

Figure 7.5a : Simulation à l'exutoire du Fé après coupe à blanc.

8. Conclusion

La coupe forestière de l'ONF effectuée sur le site pilote de Collobrières dans le cadre du projet ADAPT a été faite avec les plus grandes précautions pour maîtriser le ruissellement post-coupe. L'épandage de rémanents a certainement contribué à protéger la surface de l'érosion des sols et à maintenir un taux d'infiltration élevé. A première vue, la coupe n'a eu aucun impact sur le pic de débit, en partie grâce à sa superficie limitée, puis un impact limité sur la lame d'eau ruisselée, de l'ordre d'environ 5% selon le modèle. Cependant, ces résultats mériteraient vérification par une visite de terrain en janvier 2020 si le projet ADAPT est prêt à prolonger les mesures de terrain du CNRS dans cet objectif. Les pluies de fin 2019 étant exceptionnelles, ce serait une opportunité à ne pas manquer. Une coupe à blanc potentiel aurait certainement des conséquences dramatiques à l'échelle de la parcelle, car l'effet se ressent déjà aux échelles du sous-bassin versant et bassin versant, et ceci serait évidemment le cas aussi pour un incendie de forêt sévère sur ces pentes fortes et sols érodables.

9. Références

- Anderson B.G., Rutherford I.D., Western A.W., 2006.- An analysis of the influence of riparian vegetation on the propagation of flood waves. *Environmental Modelling & Software*, 21(9): 1290-1296.
- Bados R., Esteban L.S., Perez P., Mediavilla I., Fernandez M.J., Barro R., Corredor R. and Carrasco J.E., 2017.- Study of the production of pelletized biofuels from Mediterranean scrub biomass. 25th European Biomass Conference and Exhibition: 500-505.
- Bénichou (P) et Le Breton (O.), 1986.- Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 7ème série, n°19.- 28p.
- Braun-Blanquet (J.), 1932.- Plant sociology. The study of plant communities. Authorized english translation of « Pflanzen-soziologie » (1928), edited by Fuller, (G.D.) and Conard, (H.S.). University of Chicago III, USA.
- Brisse (H.), Grandjouan (G.), Hoff (M.) et de Ruffray (P.), 1980.- Utilisation d'un critère statistique de l'écologie en phytosociologie. Exemple des forêts alluviales en Alsace. *Colloques phytosociologiques*, IX, les forêts alluviales, Strasbourg : 543-590.
- Cabasse C., Projet ADAPT - Commune de Collobrières. Note pour validation de la méthodologie d'exploitation proposée, ONF, 25/01/2019.
- Cabasse C., Bilan de la coupe ADAPT, commune de Collobrières, Office national des forêts – Bureau d'Etudes Côte d'Azur, avril 2019.
- Cabasse C., Bilan de la coupe ADAPT, commune de Collobrières, Office national des forêts – Bureau d'Etudes Côte d'Azur, avril 2019.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Croke J., Thompson C. and Fryirs K., 2017.- Prioritising the placement of riparian vegetation to reduce flood risk and end-of-catchment sediment yields: Important considerations in hydrologically-variable regions. *Journal of Environmental Management*, 190: 9-19.
- European Union, 1993.- Second Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, 16-17 June 1993, Helsinki/Finland.
- Folton N. Tolsa M., 2019. Projet ADAPT, Commune de Collobrières : Analyse des trois premiers mois de suivi hydrologique. Mai, 2019, IRSTEA Aix-en-Provence.
- Folton N., Tolsa M., Arnaud P.. Le Bassin de recherche du Réal Collobrier - _Etude des processus hydrologiques en milieu méditerranéen a échelle fine. 50 ans de l'Orgeval, Nov 2012, Paris, France. IRSTEA, 7 p., 2012. <hal-00779374>
- Galatsidas S., Gounaris N., Vlachaki D., Dimitriadis E., Kiourtsis F., Keramitzis D., Gerwin W., Repmann F., Rettenmaier N., Reinhardt G., Ivanina V., Hanzhenko O., Gnap I., Bogatov K., Barbera F., Mattioli D., Volkmann C., Baumgarten W., 2018.- Revealing Bioenergy Potentials: Mapping Marginal Lands in Europe - The Seemla Approach. 25th European Biomass Conference and Exhibition: 31-37.
- Garbolino (E.) and Daniel (W.), 2019.- Potential vulnerability of Wood Energy Supply Chain towards 2050 in the French Mediterranean area according to global warming and the evolution of

- wildland fire hazard. EUBCE- 27th European Biomass Conference and Exhibition, Setting the course for a biobased economy, Lisbon, Portugal: 23-31.
- Garbolino (E.), Daniel (W.) and Hinojos-Mendoza (G.), 2018.- Expected Global Warming Impacts on the Spatial Distribution and Productivity for 2050 of Five Species of Trees Used in the Wood Energy Supply Chain in France. *Energies*, 11, 3372: 2-17.
- Garbolino (E.), De Ruffray (P.), Brisse (H.) et Grandjouan (G.), 2012.- The phytosociological database SOPHY as the basis of plant socio-ecology and phytoclimatology in France. *Biodiversity and Ecology*, vol. 4: 177–184.
- Garbolino (E.), De Ruffray (P.), Brisse (H.) et Grandjouan (G.), 2008.- The phytoclimates of France: probabilistic classification of 1874 bio-indicators of the climate. *Comptes Rendus Biologies*, vol. 331: 881–895.
- Garbolino (E.), De Ruffray (P.), Brisse (H.) et Grandjouan (G.), 2007.- Relationships between plants and climate in France: calibration of 1874 bio-indicators. *Comptes Rendus Biologies*, vol. 330: 159–170.
- Garbolino (E.), De Ruffray (P.), Brisse (H.), Grandjouan (G.), 2013.- Probable flora: An expression mean of ecological gradients in France. *Comptes Rendus Biologies*, Volume 336, Issue 2: 73–81
- Garbolino E., Daniel W., Hinojos Mendoza G. and Sanseverino-Godfrin V., 2017.- Anticipating climate change effect on biomass productivity and vegetation structure of Mediterranean Forests to promote the sustainability of the wood energy supply chain. EUBCE- 25th European Biomass Conference and Exhibition, "Setting the course of a biobased economy", Stockholm, Sweden, 12-15 June 2017. Ek L., Ehrnrooth H., Scarlat N., Grassi A. and Helm P. editors: 17-29.
- Garbolino E., Sanseverino-Godfrin V. and Hinojos-Mendoza G., 2016.- Describing and predicting of the vegetation development of Corsica due to expected climate change and its impact on forest fire risk evolution. *Safety Science*, vol. 88: 180–186.
- Garbolino E., Sanseverino-Godfrin V. and Hinojos-Mendoza G., 2017.- Effets probables du réchauffement climatique sur le risque d'incendie de forêt en Corse et adaptation du dispositif juridique de prévention. *Cybergeog : European Journal of Geography [En ligne]*, Environnement, Nature, Paysage, document 812, mis en ligne le 24 mars 2017, URL : <http://cybergeog.revues.org/28006>
- Gausson (H.), 1953.- La hêtraie sans hêtre. Extraits des Actes du Congrès de Luxembourg. 72ème session de l'association Française pour l'Avancement des Sciences : 733-735.
- Gonzalez-Gonzalez B.D., Sixto H., Alberdi I., Esteban L., Guerrero S., Pasalodos M., Vazquez A. and Canellas I., 2017a.- Estimation of shrub biomass availability along two geographical transects in the Iberian Peninsula for energy purposes. *Biomass and Bioenergy*, vol. 105: 211-218.
- Gonzalez-Gonzalez B.D., Sixto H., Vazquez A., Montes F., Sanchez-Gonzalez M. and Canellas I., 2017b.- Assessment of shrub biomass availability and environmental impacts of its mechanical harvesting for energy purposes: A methodological approach in the Mediterranean. 25th European Biomass Conference and Exhibition: 133-142.
- Guinochet (M.), 1973.- *Phytosociologie*. Collection écologie n°1. Paris, Masson et Cie.- 227p.

- Madrigal J., Fernández-Migueláñez I., Hernando C., Guijarro M., Vega-Nieva D. J. and Tolosana E., 2017.- Does forest biomass harvesting for energy reduce fire hazard in the Mediterranean basin? a case study in the Caroig Massif (Eastern Spain). *European Journal of Forest Research*, vol. 136 (1): 13-26.
- Mucina (L.) and Van Der Maarel (E.), 1989.- Twenty years of numerical syntaxonomy. *Vegetatio*, vol. 81 : 1-15.
- ONF, 2006.- Directive régionale d'aménagement. Méditerranée Provence-Alpes Côte d'Azur. Préalpes du Sud. ONF éditeur.- 124p.
- ONF, 2006.- Schéma régional d'aménagement. Méditerranée Provence-Alpes Côte d'Azur. Zone méditerranéenne de basse altitude.- 104p.
- Peterson D.L., Millar C.I., Joyce L.A., Furniss M.J., Halofsky J.E., Neilson R.P. and Morelli T.L., 2011.- Responding to climate change in national forests: a guidebook for developing adaptation options. General Technical Report. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Routa J., Pyörälä P., Alam A., Kilpeläinen A., Peltola H. and Kellomäki S., 2013.- Integrated Production of Timber and Energy Biomass in Forestry. In: *Forest BioEnergy Production. Management, Carbon Sequestration and Adaptation*, Kellomäki S., Kilpeläinen A. and Alam A. editors.- 268p.
- Stanchi S., Freppaza M., Agnellib A., Reinschc T. and Zanini E., 2012.- Properties, best management practices and conservation of terraced soils in Southern Europe (from Mediterranean areas to the Alps): A review. *Quaternary International*, vol. 265: 90-100.
- Stokes A., Norris J.E., van Beek L.P.H., Bogaard T., Cammeraat E., Mickovski S.B., Jenner A., Di Iorio A. and Fourcaud T., 2008.- How vegetation reinforces soil on slopes *in Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*, Norris J.E., Stokes A., Mickovski S.B., Cammeraat E., van Beek R., Nicoll B.C., Achim A. (Eds.), Springer :65-118.
- Todaro L., Scopa A., De Franchi A.S., 2007.- Caratterizzazione energetica di specie arboree e arbustive di aree collinari e montane della Basilicata. *Forest@*, vol. 4(1): 42-50.
- Vergani, C., Giadrossich, F., Buckley, P., Conedera, M., Pividori, M., Salbitano, F., Rauch, H., Lovreglio, R., and Schwarz, M.: Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review. *Earth-Science Reviews*, 167: 88–102

Annexe 1 : Pluie utilisée pour la modélisation (Période de retour de 10 ans, 130.37 mm en 24 h).

Heure	Intensité (mm/h)	hauteur (mm)	Heure	Intensité (mm/h)	hauteur (mm)	Heure	Intensité (mm/h)	hauteur (mm)
00:00	1.80	0.15	08:15	3.92	0.33	16:30	3.47	0.29
00:05	1.81	0.15	08:20	3.98	0.33	16:35	3.43	0.29
00:10	1.82	0.15	08:25	4.04	0.34	16:40	3.39	0.28
00:15	1.83	0.15	08:30	4.10	0.34	16:45	3.35	0.28
00:20	1.84	0.15	08:35	4.17	0.35	16:50	3.31	0.28
00:25	1.84	0.15	08:40	4.24	0.35	16:55	3.27	0.27
00:30	1.85	0.15	08:45	4.31	0.36	17:00	3.23	0.27
00:35	1.86	0.16	08:50	4.39	0.37	17:05	3.20	0.27
00:40	1.87	0.16	08:55	4.47	0.37	17:10	3.16	0.26
00:45	1.88	0.16	09:00	4.55	0.38	17:15	3.13	0.26
00:50	1.89	0.16	09:05	4.63	0.39	17:20	3.10	0.26
00:55	1.90	0.16	09:10	4.72	0.39	17:25	3.06	0.26
01:00	1.91	0.16	09:15	4.82	0.40	17:30	3.03	0.25
01:05	1.92	0.16	09:20	4.92	0.41	17:35	3.00	0.25
01:10	1.93	0.16	09:25	5.03	0.42	17:40	2.97	0.25
01:15	1.94	0.16	09:30	5.14	0.43	17:45	2.94	0.25
01:20	1.95	0.16	09:35	5.25	0.44	17:50	2.92	0.24
01:25	1.96	0.16	09:40	5.38	0.45	17:55	2.89	0.24
01:30	1.97	0.16	09:45	5.51	0.46	18:00	2.86	0.24
01:35	1.98	0.16	09:50	5.65	0.47	18:05	2.84	0.24
01:40	1.99	0.17	09:55	5.80	0.48	18:10	2.81	0.23
01:45	2.00	0.17	10:00	5.96	0.50	18:15	2.79	0.23
01:50	2.01	0.17	10:05	6.13	0.51	18:20	2.76	0.23
01:55	2.02	0.17	10:10	6.32	0.53	18:25	2.74	0.23
02:00	2.03	0.17	10:15	6.52	0.54	18:30	2.71	0.23
02:05	2.05	0.17	10:20	6.74	0.56	18:35	2.69	0.22
02:10	2.06	0.17	10:25	6.97	0.58	18:40	2.67	0.22
02:15	2.07	0.17	10:30	7.23	0.60	18:45	2.65	0.22
02:20	2.08	0.17	10:35	7.51	0.63	18:50	2.62	0.22
02:25	2.09	0.17	10:40	7.82	0.65	18:55	2.60	0.22
02:30	2.11	0.18	10:45	8.16	0.68	19:00	2.58	0.22
02:35	2.12	0.18	10:50	8.55	0.71	19:05	2.56	0.21
02:40	2.13	0.18	10:55	8.98	0.75	19:10	2.54	0.21
02:45	2.14	0.18	11:00	9.48	0.79	19:15	2.52	0.21
02:50	2.16	0.18	11:05	10.04	0.84	19:20	2.50	0.21
02:55	2.17	0.18	11:10	10.71	0.89	19:25	2.48	0.21
03:00	2.18	0.18	11:15	11.49	0.96	19:30	2.47	0.21
03:05	2.20	0.18	11:20	12.43	1.04	19:35	2.45	0.20
03:10	2.21	0.18	11:25	13.59	1.13	19:40	2.43	0.20
03:15	2.22	0.19	11:30	15.07	1.26	19:45	2.41	0.20
03:20	2.24	0.19	11:35	17.03	1.42	19:50	2.40	0.20
03:25	2.25	0.19	11:40	19.79	1.65	19:55	2.38	0.20
03:30	2.27	0.19	11:45	24.04	2.00	20:00	2.36	0.20
03:35	2.28	0.19	11:50	31.73	2.64	20:05	2.35	0.20
03:40	2.30	0.19	11:55	114.45	9.54	20:10	2.33	0.19
03:45	2.31	0.19	12:00	114.45	9.54	20:15	2.31	0.19

03:50	2.33	0.19	12:05	114.45	9.54	20:20	2.30	0.19
03:55	2.35	0.20	12:10	31.73	2.64	20:25	2.28	0.19
04:00	2.36	0.20	12:15	24.04	2.00	20:30	2.27	0.19
04:05	2.38	0.20	12:20	19.79	1.65	20:35	2.25	0.19
04:10	2.40	0.20	12:25	17.03	1.42	20:40	2.24	0.19
04:15	2.41	0.20	12:30	15.07	1.26	20:45	2.22	0.19
04:20	2.43	0.20	12:35	13.59	1.13	20:50	2.21	0.18
04:25	2.45	0.20	12:40	12.43	1.04	20:55	2.20	0.18
04:30	2.47	0.21	12:45	11.49	0.96	21:00	2.18	0.18
04:35	2.48	0.21	12:50	10.71	0.89	21:05	2.17	0.18
04:40	2.50	0.21	12:55	10.04	0.84	21:10	2.16	0.18
04:45	2.52	0.21	13:00	9.48	0.79	21:15	2.14	0.18
04:50	2.54	0.21	13:05	8.98	0.75	21:20	2.13	0.18
04:55	2.56	0.21	13:10	8.55	0.71	21:25	2.12	0.18
05:00	2.58	0.22	13:15	8.16	0.68	21:30	2.11	0.18
05:05	2.60	0.22	13:20	7.82	0.65	21:35	2.09	0.17
05:10	2.62	0.22	13:25	7.51	0.63	21:40	2.08	0.17
05:15	2.65	0.22	13:30	7.23	0.60	21:45	2.07	0.17
05:20	2.67	0.22	13:35	6.97	0.58	21:50	2.06	0.17
05:25	2.69	0.22	13:40	6.74	0.56	21:55	2.05	0.17
05:30	2.71	0.23	13:45	6.52	0.54	22:00	2.03	0.17
05:35	2.74	0.23	13:50	6.32	0.53	22:05	2.02	0.17
05:40	2.76	0.23	13:55	6.13	0.51	22:10	2.01	0.17
05:45	2.79	0.23	14:00	5.96	0.50	22:15	2.00	0.17
05:50	2.81	0.23	14:05	5.80	0.48	22:20	1.99	0.17
05:55	2.84	0.24	14:10	5.65	0.47	22:25	1.98	0.16
06:00	2.86	0.24	14:15	5.51	0.46	22:30	1.97	0.16
06:05	2.89	0.24	14:20	5.38	0.45	22:35	1.96	0.16
06:10	2.92	0.24	14:25	5.25	0.44	22:40	1.95	0.16
06:15	2.94	0.25	14:30	5.14	0.43	22:45	1.94	0.16
06:20	2.97	0.25	14:35	5.03	0.42	22:50	1.93	0.16
06:25	3.00	0.25	14:40	4.92	0.41	22:55	1.92	0.16
06:30	3.03	0.25	14:45	4.82	0.40	23:00	1.91	0.16
06:35	3.06	0.26	14:50	4.72	0.39	23:05	1.90	0.16
06:40	3.10	0.26	14:55	4.63	0.39	23:10	1.89	0.16
06:45	3.13	0.26	15:00	4.55	0.38	23:15	1.88	0.16
06:50	3.16	0.26	15:05	4.47	0.37	23:20	1.87	0.16
06:55	3.20	0.27	15:10	4.39	0.37	23:25	1.86	0.16
07:00	3.23	0.27	15:15	4.31	0.36	23:30	1.85	0.15
07:05	3.27	0.27	15:20	4.24	0.35	23:35	1.84	0.15
07:10	3.31	0.28	15:25	4.17	0.35	23:40	1.84	0.15
07:15	3.35	0.28	15:30	4.10	0.34	23:45	1.83	0.15
07:20	3.39	0.28	15:35	4.04	0.34	23:50	1.82	0.15
07:25	3.43	0.29	15:40	3.98	0.33	23:55	1.81	0.15
07:30	3.47	0.29	15:45	3.92	0.33	00:00	1.80	0.15
07:35	3.51	0.29	15:50	3.86	0.32			
07:40	3.56	0.30	15:55	3.81	0.32			
07:45	3.60	0.30	16:00	3.75	0.31			
07:50	3.65	0.30	16:05	3.70	0.31			
07:55	3.70	0.31	16:10	3.65	0.30			

Livable L7

08:00	3.75	0.31	16:15	3.60	0.30			
08:05	3.81	0.32	16:20	3.56	0.30			
08:10	3.86	0.32	16:25	3.51	0.29			