



Livrable 4

Modélisation hydrologique de l'impact de l'évolution de l'occupation du sol sur le ruissellement

Par

Manon Le Gourriec, GéoConsult

Pour

Dennis Fox, UMR 7300 ESPACE CNRS

Dans le cadre de projet ADAPT

13 Décembre 2019

Table des matières

Liste des figures	3
Liste des tableaux	3
Introduction	4
1. Méthode	5
1.1. Description du matériel et du site à l'étude	5
1.1.1. Matériel	5
1.1.2. Site à l'étude : délimitation du bassin versant et des sous-bassins versant	5
1.2. Analyse de l'évolution du bâti et estimation de l'imperméabilité du sol en aval du massif de la « Colle Noire »	6
1.2.1. Quantification de l'évolution du bâti entre 1989, 1999 et 2014 en aval de la Colle Noire	6
1.2.1. Définition de la couche d'imperméabilité du sol par zone tampon et méthode de points aléatoires	7
1.3. Détermination des données de calibrage du modèle hydrologique	8
1.3.1. Caractérisation des sols du massif de la « Colle Noire ».....	9
1.3.2. Détermination du « Curve Number » et de ses caractéristiques.....	9
1.3.3. Définition du pourcentage d'imperméabilisation par sous bassin versant	10
2. Résultats	11
2.1. Evolution du bâti et du taux d'imperméabilité du sol dans le bassin versant à l'étude, entre 1989 et 2014.....	11
2.1.1. Evolution du bâti en aval de la « Colle Noire » entre 1989, 1999 et 2014.....	11
2.1.2. Evolution des catégories et définition du taux l'imperméabilité du sol entre 1989 et 2014	13
2.2. Analyse des sols du massif de la « Colle Noire ».....	14
2.2.1. Composition du sol.....	14
2.2.2. Epaisseur et texture du sol.....	14
2.2.3. Localisation géographique :	16
2.3. Modélisation hydrologique à l'aide du modèle HEC-HMS : résultats de simulations.....	18
2.3.1. Evolution du débit en fonction de l'année.....	18
2.3.2. Evolution du débit en fonction de l'évènement pluvieux.....	21
3. Interprétation et discussion	22
3.1. Impact de l'évolution du bâti en aval de la « Colle Noire » sur le ruissellement.....	22
3.2. Evolution de la vulnérabilité du bâti en aval de la « Colle Noire ».....	22
Conclusion	23
Références	23
ANNEXES	24

Liste des figures

Fig. 1 : Carte du bassin versant et des sous-bassins versants à l'étude, en aval de la Colle Noire, réalisée à partir du MNT de la commune Le Pradet.....	6
Fig. 2 : Création de zones tampons et points aléatoires : exemple basé sur la couche de bâti de 1989.	8
Fig. 3 : Vue sur la commune du Pradet et du bâti diffus en aval de la « Colle Noire » (E. Garbolino)	11
Fig. 4 : Carte d'évolution du bâti entre 1989, 1999 et 2014 en aval de la Colle Noire.	12
Fig. 5 : Affleurement et profil de sol sur le massif de la « Colle Noire » (Crédit : D. Fox).....	15
Fig. 6 : Sol argileux et caillouteux sur le massif de la « Colle Noire » (Crédit : D. Fox)	15
Fig. 7 : Maquis dense sur le massif de la « Colle Noire » (Crédit : E. Garbolino).....	15
Fig. 8 : Carte localisant les lieux d'échantillonnage sur le Massif de la « Colle Noire ».....	17
Fig. 9 : Simulation du ruissellement en 1989 à P5.....	18
Fig. 10 : Simulation du ruissellement en 1989 à P10.....	18
Fig. 11 : Simulation du ruissellement en 1989 à P30.....	19
Fig. 12 : Simulation du ruissellement en 1989 à P100.....	19
Fig. 13 : Simulation du ruissellement en 1999 à P5.....	19
Fig. 14 : Simulation du ruissellement en 1999 à P10.....	19
Fig. 15 : Simulation du ruissellement en 1999 à P30.....	19
Fig. 16 : Simulation du ruissellement en 1999 à P100.....	19
Fig. 17 : Simulation du ruissellement en 2014 à P5.....	20
Fig. 18 : Simulation du ruissellement en 2014 à P10.....	20
Fig. 19 : Simulation du ruissellement en 2014 à P30.....	20
Fig. 20 : Simulation du ruissellement en 2014 à P100.....	20

Liste des tableaux

Tab. 1 : Superficie du bassin versant et des sous-bassins versant à l'étude	6
Tab. 2 : Pourcentage d'imperméabilité du sol par sous bassin versant en fonction des années.....	10
Tab. 3 : Superficie occupée par du bâti dans le bassin versant à l'étude, en aval de la Colle Noire en 1989, 1999 et 2014.....	12
Tab. 4 : Evolution du bâti sur le bassin versant à l'étude entre 1989 et 2014.....	12
Tab. 5 : Superficie occupée par chaque catégorie en 1989, 1999 et 2014.....	13
Tab. 6 : Evolution de la superficie des catégories entre 1989 et 2014	13
Tab. 7 : Pourcentage de sols imperméables par rapport à la distance du bâti dans le bassin versant de la Colle Noire à l'étude.	14
Tab. 8 : Composition du sol de la Colle Noire en pourcentage d'après les échantillons relevés sur le terrain.	14
Tab. 9 : Informations relatives aux échantillons prélevés sur le massif de la Colle Noire, Commune du Pradet	16
Tab. 10 : Synthèse des débits de pointe et des volume d'eau ruisselée répertoriés dans les différentes simulations réalisées dans HEC-HMS.....	21

Introduction

Dans le cadre du projet Interreg Marittimo ADAPT, une première analyse de l'évolution de l'occupation du sol sur la commune du Pradet, site pilote dans le cadre du projet ADAPT, a été effectuée à l'aide d'orthophotographies historiques (1989, 1999, 2014).

La deuxième étape du projet consiste à analyser l'impact de l'évolution de l'occupation du sol sur le ruissellement en aval du massif de la « Colle Noire » ; étape déléguée à GéoConsult.

Par définition, l'imperméabilisation du sol est amenée par l'artificialisation et le recouvrement de celui-ci par un matériau imperméable, tel que l'asphalte ou le béton (Commission européenne, 2012). L'augmentation de constructions conduit donc à la croissance de sols imperméabilisés ce qui accentue le phénomène de ruissellement urbain. Plus précisément, en augmentant la proportion de surfaces imperméables, l'urbanisation diminue le taux d'infiltration global et augmente alors le ruissellement total, augmente le ruissellement de pointe et raccourcit le délai de réponse face à celui-ci.

Il est donc important de procéder par étape pour réaliser cette étude visant à modéliser l'impact de l'évolution de l'occupation du sol sur le ruissellement et sur la vulnérabilité du bâti. La première étape de la présente étude consiste à quantifier l'évolution du bâti afin d'estimer l'évolution de l'occupation du sol par des surfaces imperméables. La deuxième étape concerne le calibrage des données d'entrée dans le modèle hydrologique. Enfin, la modélisation hydrologique via le logiciel HEC-HMS est réalisée afin d'évaluer l'évolution des débits en aval de la Colle Noire dû au ruissellement pour les années 1989, 1999, et 2014 pour des événements-types avec des périodes de retour de 5, 10, 30 et 100 ans.

1. Méthode

En partant des données existantes pour la zone d'étude, la quantification de l'imperméabilité du sol et la stratégie de modélisation à utiliser constituent les premières étapes de ce projet et sont décrites en détail ci-dessous.

1.1. Description du matériel et du site à l'étude

1.1.1. Matériel

Données numériques utilisées :

- Un Modèle Numérique de Terrain au format .tif d'une résolution spatiale de 1 m.
- Des couches vectorielles du bâti au format .shp pour les années 1989, 1999, et 2014.
- Des données d'épaisseur du sol et de texture du sol à partir d'échantillons prélevés sur la Colle Noire.
- Des données pluviométriques pour un événement type pour des périodes de retour de 5, 10, 30 et 100 ans de l'évènement pluvieux sur 24 heures.

Logiciels utilisés :

- ArcGis
- Terrset
- HEC-HMS

1.1.2. Site à l'étude : délimitation du bassin versant et des sous-bassins versant

La présente étude se concentre sur la zone aval du massif de la « Colle Noire » dans la partie est de la commune du Pradet (commune française se situant dans le département du Var (83), région Sud – Provence-Alpes-Côte d'Azur).

Pour délimiter le bassin versant et les sous-bassins versants à l'étude, des traitements sont apportés au Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution spatiale de 1 m. L'ensemble des traitements sont réalisés via la barre d'outils HEC-geoHSM d'ArcMap. Le point de captage, à l'embouchure du bassin versant à l'étude, est indiqué manuellement (fonction « Add project point » de la barre d'outil) et permet de délimiter et générer la zone de captage. Le logiciel crée alors automatiquement des sous-bassins versants. Certains d'entre eux, très petits, sont fusionnés pour n'en former que 3 (W670, W680 et W790) de superficies proches (Fig. 1, Tab. 1). Cette étape permet un traitement optimisé et simplifié dans le logiciel HEC-HMS en minimisant les biais dus au court temps de retard pour les petits sous-bassins versants et le délai de traitement dû à la saisie non automatique de certaines données dans le logiciel HEC-HMS.

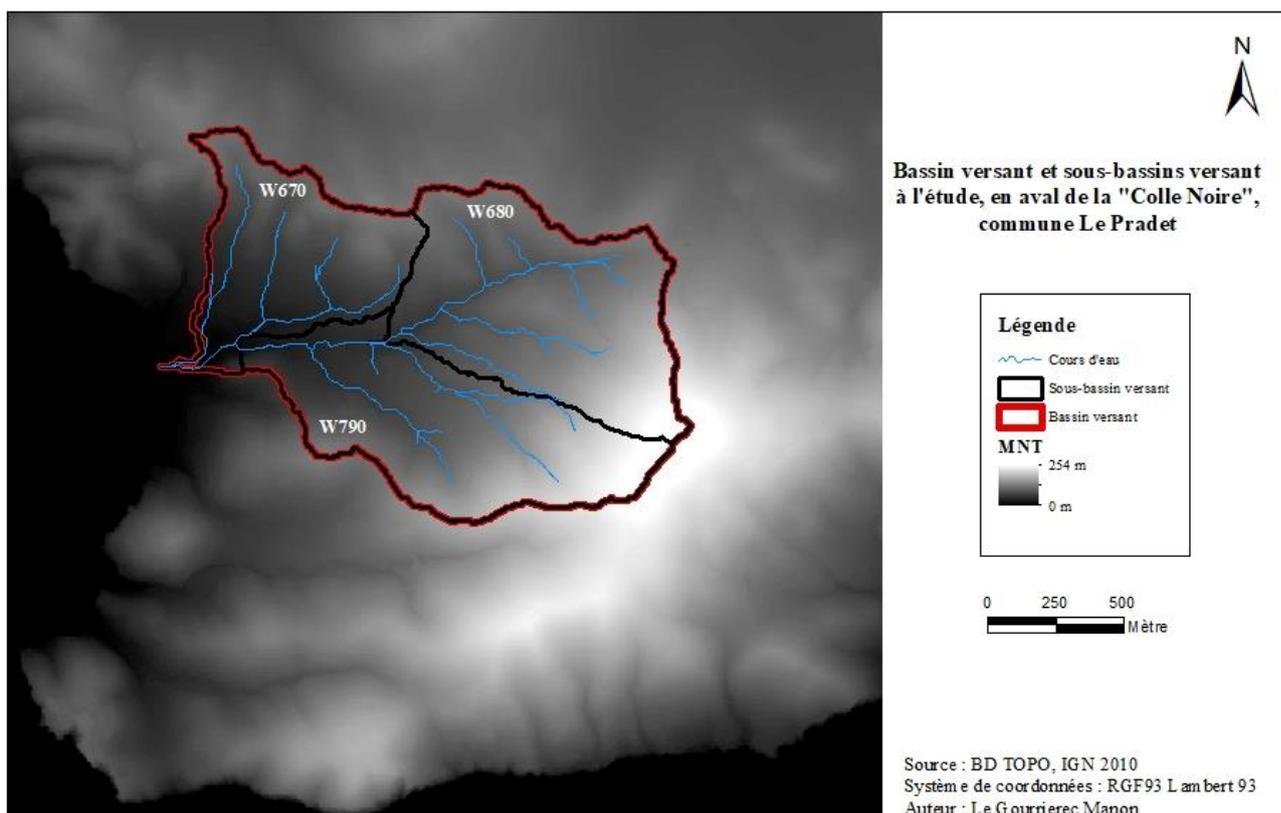


Fig. 1 : Carte du bassin versant et des sous-bassins versants à l'étude, en aval de la Colle Noire, réalisée à partir du MNT de la commune Le Pradet.

Tab. 1 : Superficie du bassin versant et des sous-bassins versant à l'étude

Sous-bassin versant	Superficie (m ²)
W670	430728
W680	660142
W790	614161
Total	1705031

1.2. Analyse de l'évolution du bâti et estimation de l'imperméabilité du sol en aval du massif de la « Colle Noire »

Par définition, plus une zone est artificialisée, plus son imperméabilité est élevée. Afin de calculer le pourcentage d'imperméabilité du sol, il est donc essentiel de déterminer au plus près les surfaces affectées par le bâti.

1.2.1. Quantification de l'évolution du bâti entre 1989, 1999 et 2014 en aval de la Colle Noire

L'étude de l'évolution du bâti est faite en aval de la Colle Noire, dans la partie Est de la commune du Pradet, entre 1989, 1999 et 2014. Afin de réaliser celle-ci, les couches de bâti 1999 et 2014 sont superposées sur la couche de bâti de 1989 pour extraire les données propres

à 1999 et à 2014. L'extraction est faite grâce à l'outil « *Erase* » d'ArcMap. Un léger décalage est observé entre la position des bâtiments de 1989 et de ceux de 1999 et 2014. Le décalage étant minime seul des polygones de faible superficie sont résiduels. Une rectification est apportée afin de supprimer ces polygones résiduels en utilisant la sélection par attribut et en apportant une vérification visuelle.

Pour quantifier l'évolution du bâti entre 1989 et 2014, un calcul de superficie occupée par celui-ci est fait à chacune des 3 dates (1989, 1999, 2014). Un pourcentage d'évolution est alors calculé et une comparaison par rapport à la superficie de la zone d'étude réalisée.

1.2.1. Définition de la couche d'imperméabilité du sol par zone tampon et méthode de points aléatoires

Afin d'estimer le niveau d'imperméabilité du sol en périphérie du bâti, des zones tampons sont créées autour des bâtiments (Fig. 2) pour les 3 années à l'étude. Cinq catégories, de 1 à 5, sont alors élaborées et sont définies comme suit :

- (1) Zone totalement imperméable : surfaces de bâtiment
- (2) Imperméabilité élevée : 0-10 m autour des bâtiments
- (3) Imperméabilité intermédiaire 10-20 m autour des bâtiments
- (4) Imperméabilité faible : 20-30 m autour des bâtiments
- (5) Zone considérée comme perméable : >30 m

Lorsque deux catégories différentes se chevauchent, la catégorie avec la plus grande imperméabilité est retenue.

La détermination du pourcentage d'imperméabilité du sol dans chacune de ces catégories est alors réalisée à partir des zones tampons et de points aléatoires (fonction « *Random point* » d'ArcMap). Un quadrillage est créé pour faciliter le repérage lors de l'examen visuel des points. Les 1 500 points répartis de manière aléatoire sont superposés sur les photographies aériennes en haute résolution de la zone d'étude ainsi que sur la couche regroupant les zones tampons précédemment créée (Fig. 2). Chaque point est alors examiné visuellement et deux valeurs lui sont attribuées :

- 0 pour perméable ou 1 pour imperméable (détermination à partir des photographies aérienne).
- 1, 2, 3, 4 ou 5 en fonction de la catégorie sur laquelle il se trouve (zones tampons).

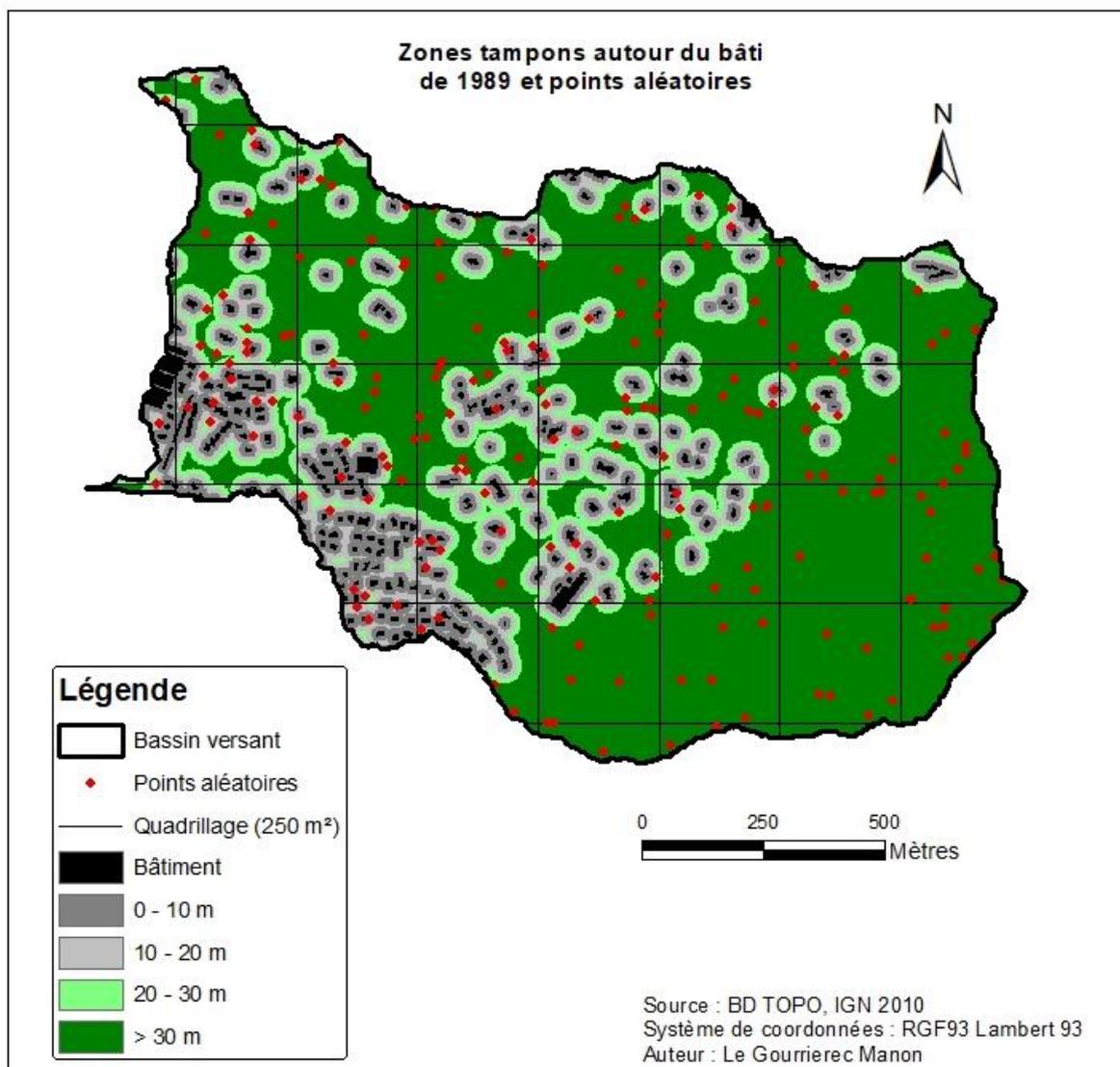


Fig. 2 : Création de zones tampons et points aléatoires : exemple basé sur la couche de bâti de 1989.

Au total, 220 points se trouvant dans le bassin versant et dans sa proche périphérie ont été analysés. Le taux d'imperméabilité du sol est ensuite calculé pour chaque catégorie et appliqué aux couches de zones tampons créées pour 1989, 1999 et 2014.

1.3. Détermination des données de calibrage du modèle hydrologique

Il existe de nombreuses stratégies de modélisation hydrologique dans HEC-HMS. Afin d'isoler l'impact de l'imperméabilité du sol sur le ruissellement, la stratégie retenue dans cette étude consiste à définir séparément le Curve Number (CN) (méthode développée par le Service de Conservation des Sols (SCS) des États-Unis) et le pourcentage d'imperméabilité du sol.

La modélisation se basera également sur les données pluviométriques d'événements pluvieux d'une journée ayant des périodes de retour de 5, 10, 30 et 100 ans et dont le pas de temps de 5 minutes sera conservé dans le modèle. Dans ce travail, les données faisant référence à un

évènement fin automnal / début hivernal nous permettent de considérer les sols de notre secteur d'étude comme plutôt humides. Aucune valeur de débit n'étant connue pour cette étude, ce facteur ne pourra entrer dans le calibrage des données d'entrée du modèle.

1.3.1. Caractérisation des sols du massif de la « Colle Noire »

Afin de définir la composition du sol, l'examen des échantillons de sols relevés sur le massif de la « Colle Noire » par D. Fox et G. Georges est réalisé. Pour cela, l'ensemble des données « d'analyse de terre » sont concaténées, en fonction du lieu du prélèvement et de la profondeur à laquelle celui-ci a été prélevé. On note alors deux types d'échantillons, ceux prélevés dans les 20 premiers centimètres à partir de la surface du sol et ceux, moins nombreux, prélevés au-delà de 20 cm.

Sachant que le CN est déterminé en fonction de l'occupation du sol et des propriétés du sol (Chow et al. 1988), l'analyse des données terrain en notre possession est également réalisée. L'évaluation de l'épaisseur du sol, de sa composition (texture, structure, porosité) et de son occupation ainsi que l'analyse des données géographique associées aux échantillons (lieu, orientation, pente, altitude) sont effectuées. L'ensemble des données sont regroupées dans un tableau et les photographies prises sur le terrain sont examinées. La valeur du CN pouvant varier spatialement, la possibilité de corrélation entre les différentes données est étudiée.

Afin de localiser plus précisément les lieux d'échantillonnage par rapport à la zone d'étude, ceux-ci sont géoréférencés et superposés sur les photographies aériennes, le MNT et le contour du bassin versant à l'étude. Après vérification des données, il apparaît que les valeurs d'altitudes mentionnées pour chaque échantillon de la Colle Noire ne correspondent pas à l'altitude indiquée sur le MNT de la zone d'étude. La correction de ces valeurs est alors faite sur ArcGIS en attribuant la valeur d'élévation du MNT à chacun des points.

1.3.2. Détermination du « Curve Number » et de ses caractéristiques

Comme mentionné, le logiciel HEC-HMS utilisé pour les modélisations hydrologiques de cette étude nécessite de déterminer le Curve Number (CN). Le CN est une valeur clé, comprise entre 0 et 100, qui influence le ruissellement ; plus sa valeur est élevée, plus le ruissellement est important. Pour définir la valeur du CN, des tables basées sur l'occupation du sol et les propriétés du sol existent. Il est, en complément de cela, préconisé de baser son choix sur des valeurs de CN régionales.

Dans la présente étude, la valeur du CN est définie à l'aide du tableau de Chow et al. 1988 (Annexe 1). Ici, la nature du sol de la Colle Noire (Cf. partie 2.2.) nous amène à nous concentrer sur des sols compris entre le groupe B et le groupe C. L'occupation du sol par du maquis dense, faisant référence à des surfaces enherbés et forêt, ainsi que le caractère humide du sol défini par la période à l'étude, nous permettent d'établir une valeur de CN à 70 (valeur cohérente avec d'autres études faites sur la région dans un contexte similaire).

Par ailleurs, les données de terrain fournies ne nous permettent pas de mettre en exergue une corrélation entre données topographiques et typologie du sol. Il nous est donc impossible de déterminer spatialement une typologie de sol qui varierait systématiquement avec la topographie pour notre terrain d'étude. De fait, ne pouvant pas définir plus précisément le CN en le faisant varier dans l'espace, une valeur unique de 70 est retenue pour notre zone d'étude. Le CN est intégré au modèle sous forme d'une couche raster à valeur unique pour l'ensemble de la zone d'étude.

1.3.3. Définition du pourcentage d'imperméabilisation par sous bassin versant

Le CN étant le même pour l'ensemble des simulations, il est nécessaire de faire varier les valeurs de pourcentage d'imperméabilité du sol en fonction des années pour visualiser l'évolution du ruissellement. Pour plus de précision, ces valeurs sont calculées par sous bassin versant via ArcMap (« Subbasin Parameters From Raster ») en utilisant les données d'imperméabilité du sol de chacune des dates à l'étude. Chaque pourcentage sera intégré manuellement dans le modèle sur HEC-HMS avant le lancement de la simulation.

Tab. 2 : Pourcentage d'imperméabilité du sol par sous bassin versant en fonction des années.

	W670	W680	W790
1989	0.259582	0.172872	0.233749
1999	0.286615	0.187927	0.253577
2014	0.305989	0.197741	0.258269

Les simulations historiques ont été effectuées en maintenant la valeur CN constante à 70 et en modifiant le taux d'imperméabilisation dans le temps pour chaque année (1989, 1999 et 2014).

2. Résultats

2.1. Evolution du bâti et du taux d'imperméabilité du sol dans le bassin versant à l'étude, entre 1989 et 2014

2.1.1. Evolution du bâti en aval de la « Colle Noire » entre 1989, 1999 et 2014

Lorsque l'on analyse le bâti entre 1989 et 2014, on s'aperçoit que l'évolution de celui-ci sur la commune est plus prononcée entre 1989 et 1999 qu'entre 1999 et 2014 avec des évolutions respectives de + 13,2% et + 5,7% (Annexe 2).

En s'intéressant plus précisément au bâti se trouvant en aval de la Colle Noire, on peut voir sur les figures 3 et 4 que la zone d'étude est très faiblement occupée par du bâti et que celui-ci est de type « diffus ». La zone la plus impactée par la construction de nouveaux bâtis se trouve à l'aval du bassin versant, zone regroupant déjà en 1989 le plus de bâtiments. Quelques nouveaux bâtiments sont également visibles à l'amont du bassin versant alors que la partie centrale n'est quasiment pas changée entre 1989 et 2014.

Au total, moins de 4 % de la superficie du bassin versant est occupée par du bâti et ce quelle que soit l'année à laquelle on se réfère (Tab. 3). D'autre part, on peut voir une décroissance de l'augmentation de l'occupation du sol par du bâti. En effet, les résultats montrent une évolution plus prononcée entre 1989 et 1999 qu'entre 1999 et 2014 avec des évolutions respectives de + 4,75 % et + 0,33 % des surfaces occupées par le bâti (Tab. 4). Sur la totalité de la période étudiée, une augmentation globale de 5,10 % est observée.



Fig. 3 : Vue sur la commune du Pradet et du bâti diffus en aval de la « Colle Noire » (E. Garbolino)

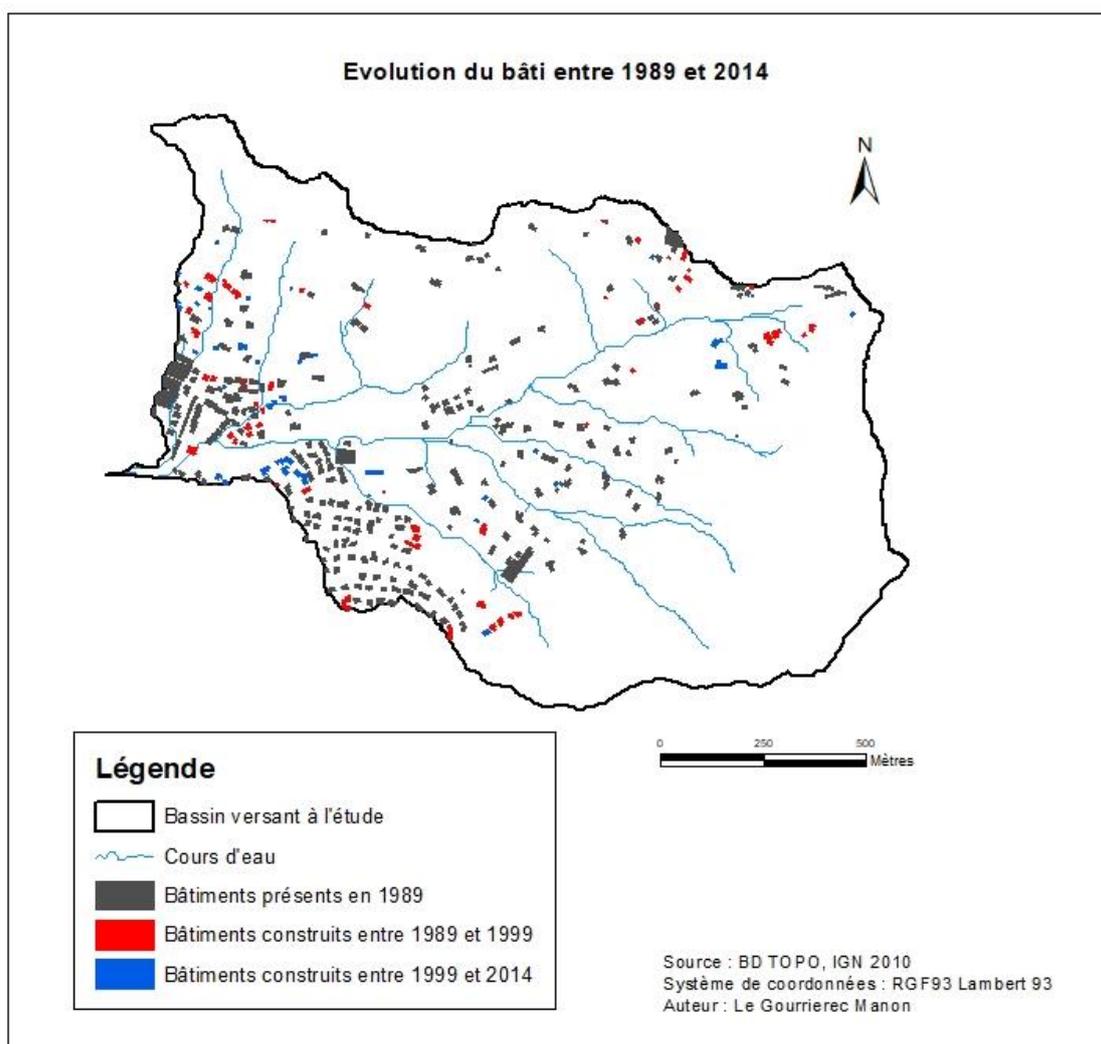


Fig. 4 : Carte d'évolution du bâti entre 1989, 1999 et 2014 en aval de la Colle Noire.

Tab. 3 : Superficie occupée par du bâti dans le bassin versant à l'étude, en aval de la Colle Noire en 1989, 1999 et 2014.

	Superficie du bâti (m ²)	Bassin versant occupé par du bâti (%)
1989	64034	3.76
1999	67077	3.93
2014	67296	3.95

Tab. 4 : Evolution du bâti sur le bassin versant à l'étude entre 1989 et 2014.

	Augmentation de la surface du bâti (m ²)	Evolution du bâti (%)
1989 - 1999	3044	4.75
1999 - 2014	219	0.33
1989 - 2014	3263	5.10

2.1.2. Evolution des catégories et définition du taux l'imperméabilité du sol entre 1989 et 2014

Lorsque l'on regarde maintenant l'évolution de chaque catégorie définie en rapport à la distance aux bâtiments, on s'aperçoit que les catégories 2, 3 et 4 (de 0 à 30 m autour du bâtiment) suivent la même tendance que le bâti est augmentent leurs superficies alors que la catégorie 5 diminue (Tab. 5). Les zones les plus proches du bâti augmentent donc au détriment de la plus éloignées. La catégorie 4 (20 - 30 m) est la moins affectée avec une superficie variant d'un peu moins d'un hectare alors que la superficie de la catégorie 2 (0 – 10 m), la plus changeante, varie de 3,31 ha entre 1989 et 2014. Cela est cohérent avec les résultats trouvés ci-dessus pour le bâti et confirme que l'évolution du bâti s'est essentiellement opérée par densification des zones les plus fortement construites au sein du bassin versant.

De même, on remarque une nette décroissance d'évolution entre la période 1989-1999 et la période 1999-2014. En effet, la croissance de la catégorie 2 (0 – 10 m), par exemple, est de +2,10 ha, soit +9,37 %, entre 1989 et 1999, alors qu'elle n'est plus que de +1.21 ha, soit +4,92 %, entre 1999 et 2014 (Tab. 6). Bien qu'ayant une superficie faiblement évolutive, la catégorie 4 (20 – 30 m) est la plus touchée par cette décroissance, en passant de +0.58 ha entre 1989 et 1999, à +0,18 ha entre 1999 et 2014.

Tab. 5 : Superficie occupée par chaque catégorie en 1989, 1999 et 2014

Catégorie		Superficie (ha) en 1989	Superficie (ha) en 1999	Superficie (ha) en 2014
2	0 - 10 m	22.42	24.52	25.72
3	10 - 20 m	18.30	19.21	19.73
4	20 - 30 m	12.76	13.35	13.53
5	> 30 m	90.67	86.52	84.48

Tab. 6 : Evolution de la superficie des catégories entre 1989 et 2014

Catégorie	Evolution de la superficie entre 1989 et 1999		Evolution de la superficie entre 1999 et 2014		Evolution de la superficie entre 1989 et 2014	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
0 - 10 m	2.10	9.37	1.21	4.92	3.31	14.75
10 - 20 m	0.91	4.99	0.52	2.69	1.43	7.81
20 - 30 m	0.58	4.57	0.18	1.34	0.76	5.98
> 30 m	-4.15	-4.58	-2.04	-2.36	-6.20	-6.83

Le tableau 7 montre les résultats obtenus pour la définition de la couche d'imperméabilité du sol par catégorie définie en rapport à la distance aux bâtiments. Comme imaginé et en cohérence avec la notion d'imperméabilisation des sols, on remarque que le taux obtenu grâce à la méthode de zones tampons et points aléatoires est inversement proportionnel à la distance du bâti à laquelle on se situe. En effet, plus la zone est éloignée d'un bâtiment, moins celle-ci est imperméable, on note donc une imperméabilité de 100 % pour la zone occupée par le bâtiment alors qu'elle n'est que de 4,5 % pour les sols se trouvant à plus de 30 m de celui-ci.

Tab. 7 : Pourcentage de sols imperméables par rapport à la distance du bâti dans le bassin versant de la Colle Noire à l'étude.

Catégorie	Nombre de points examinés	Points sur surface imperméable	% imperméable
Bâtiment	8	8	100.0
0-10 m	49	36	73.5
10-20 m	47	16	34.0
20-30 m	27	8	29.6
>30 m	89	4	4.5

2.2. Analyse des sols du massif de la « Colle Noire »

2.2.1. Composition du sol

Les données issues des relevés terrain, montrent que le sol de la Colle Noire comporte à la fois une grande proportion de composés fin (argile et limon fin) et de sable grossier. De manière plus précise, nous pouvons voir que la nature du sol varie en fonction de la profondeur à laquelle l'échantillon est prélevé (Tab. 8). En effet, plus l'échantillon est prélevé en profondeur, plus la proportion d'argile augmente et celle de sable grossier diminue. On relève, pour les échantillons prélevés dans les premiers 20 cm de la surface du sol, un taux d'argile variant entre 11,8 % et 21,8 % et un taux de sable grossier variant entre 20,7 % et 38,8 %. Alors que les taux d'argile oscillent 21,1 % et 31,5 % et ceux de sable grossier entre 12,2 % et 34,7 % dans les échantillons prélevés à plus de 20 cm de profondeur.

Tab. 8 : Composition du sol de la Colle Noire en pourcentage d'après les échantillons relevés sur le terrain.

	N1		N2		N3		N4		N5		N23		N24		N25		N26	
	0 - 20 cm	0 - 20 cm	> 20 cm	0 - 20 cm	> 20 cm	0 - 20 cm	> 20 cm	0 - 20 cm	> 20 cm	0 - 20 cm	> 20 cm	0 - 20 cm	0 - 20 cm	0 - 20 cm	> 20 cm	0 - 20 cm	> 20 cm	
% Argile	14.8	13.2	25.1	18.3	31.5	18.7	21.1	18.3	22.9	21.5	21.8	14.8	30.5	11.8				
% Limon fin	21.0	17.3	16.9	21.7	18.4	19.3	17.8	23.5	23.0	27.3	20.1	19.4	19.9	17.3				
% Limon grossier	13.5	18.1	17.0	16.6	14.2	10.1	9.8	20.9	19.4	12.7	12.5	18.5	19.1	11.2				
% Sable fin	22.6	20.0	16.9	15.7	13.0	16.4	16.7	15.1	14.5	17.9	13.7	22.9	18.3	20.9				
% Sable grossier	28.1	31.6	24.1	27.8	23.0	35.6	34.7	22.2	20.3	20.7	31.8	24.4	12.2	38.8				

2.2.2. Epaisseur et texture du sol

De manière générale, l'épaisseur du sol est plus faible sur les zones de crête et plus importante lorsque le dénivelé diminue. Les photographies aériennes et les photographies terrains (Fig. 5 et 6) mettent en évidence des sols maigres et caillouteux. Les données relevées lors de l'échantillonnage terrain révèlent dans notre cas des épaisseurs de sols variant de 20 cm à 110 cm (Tab. 9).



Fig. 5 : Affleurement et profil de sol sur le massif de la « Colle Noire » (Crédit : D. Fox)

La porosité du sable grossier en surface induit une infiltration de l'eau alors que l'argile en profondeur augmente sa rétention. Cette composition du sol est bénéfique pour la végétation et cela se reflète généralement par une végétation dense. Ici, la composition et l'épaisseur du sol favorise une occupation par une végétation arbustive dense sur la quasi-totalité des sites échantillonnés (Tab. 9), caractéristique du maquis méditerranéen (Fig. 7).



Fig. 6 : Sol argileux et caillouteux sur le massif de la « Colle Noire » (Crédit : D. Fox)



Fig. 7 : Maquis dense sur le massif de la « Colle Noire » (Crédit : E. Garbolino)

Tab. 9 : Informations relatives aux échantillons prélevés sur le massif de la Colle Noire, Commune du Pradet.

Nom	Description	Orientation	Pente	Epaisseur du sol (cm)	Altitude (m)	Nombre d'échantillon	Auteur
N1	Versant convexe au-dessus (30 à 40 m) de la piste DFCI - Sol caillouteux avec une végétation arbustive moyennement dense	OUEST	20°	70-80	159	3 (1.1 - 1.2 - 1.3)	Dennis Fox
N2	Flanc de Vallon au-dessus (5 à 10 m) de la piste C29 - Sol caillouteux avec une végétation arbustive dense	SUD-OUEST	25°	2.1 = 90-100 2.2 = 100-110	95	4 (2.1 - 2.1 bis - 2.2 - 2.2 bis)	Dennis Fox
N3	Chênaie en-dessous (10 à 15 m) du chemin d'une citerne DFCI - Suberaie dense	OUEST	10°	3.1 = 130-140 3.2 = 90-100	192	4 (3.1 - 3.1 bis - 3.2 - 3.2 bis)	Dennis Fox
N4	Flanc de Vallon ouvert au-dessus du site 3 environ 50 m - Arbustes dense	OUEST	10°		209	4 (4.1 - 4.1 bis - 4.2 - 4.2 bis)	Dennis Fox
N5	En-dessous e la piste de retour - Chênaie ouverte et sous-bois dense - Sol avec de gros blocs		15°	40-50	147	2 (5.1 - 5.1 bis)	Dennis Fox
N23	Suberaie ouverte - Sous-bois dense (100%) - Maquis très dense (difficile d'accès) - Sol très caillouteux	OUEST	30°	20	155	1 (23.1)	Gabriel George
N24	Maquis bas dense (90%) - Accès plus simple que le précédent - Sol caillouteux	SUD-OUEST	25°	20	173	1 (24.1)	Gabriel George
N25	Maquis bas (90%) avec Pin maritime - Sol caillouteux et végétation dense	NORD-OUEST	15°	30-40	66	2 (25.1 - 25.1 bis)	Gabriel George
N26	Maquis assez ouvert (70%) - Sol caillouteux	NORD-OUEST	10°	30	74	1 (26.1)	Gabriel George

2.2.3. Localisation géographique :

L'ensemble des échantillons listés en tableau 1 ont été prélevés sur le massif de la « Colle Noire » (Fig. 8) et plus précisément sur des pentes allant de 10° à 30° orientées essentiellement à l'ouest. L'altitude varie elle, entre 66 m et 74 m pour les points les plus éloignés (N25, N26) et entre 95 m et 209 m pour ceux se trouvant au sein du bassin versant ou dans sa proche périphérie.

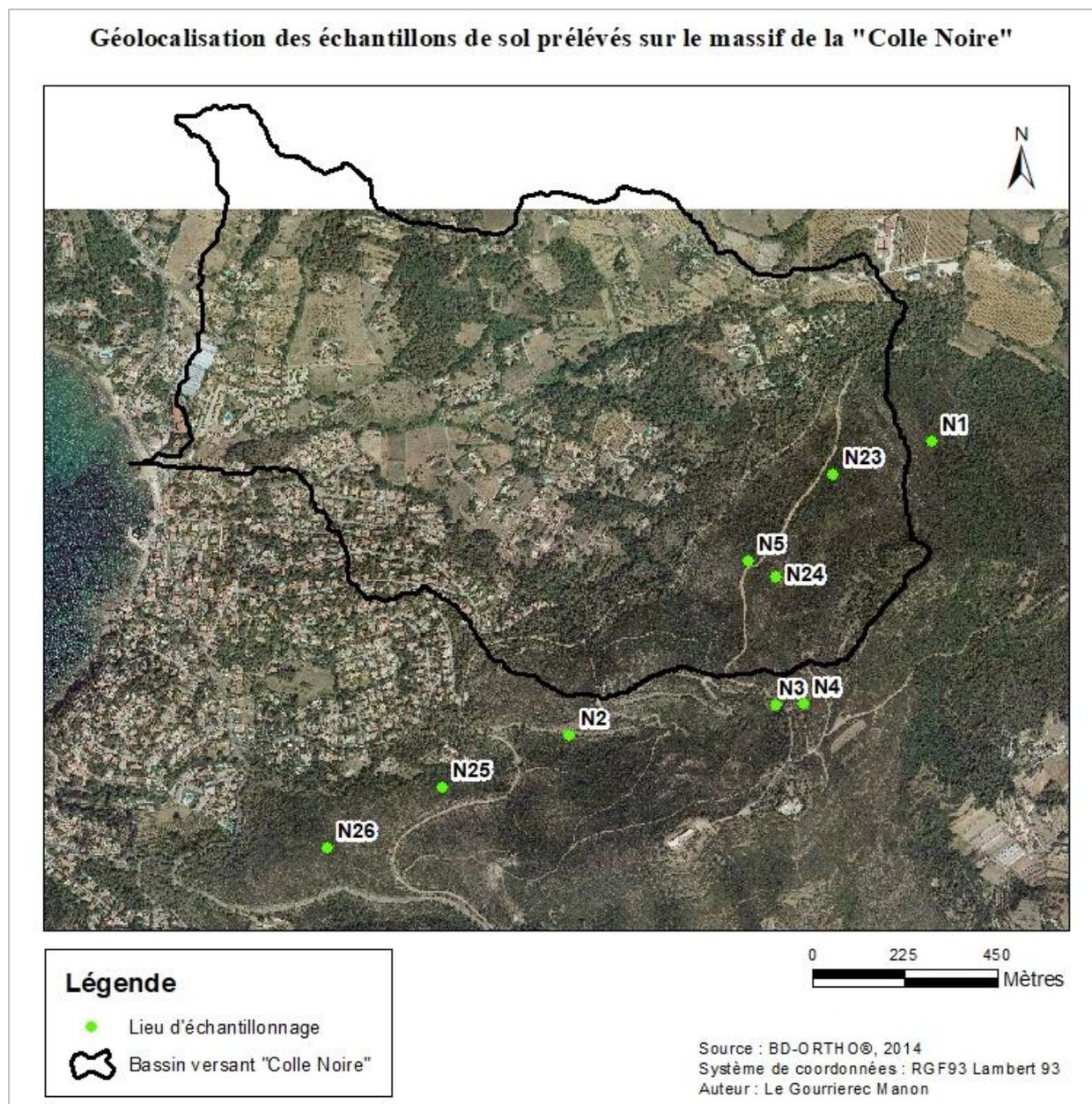


Fig. 8 : Carte localisant les lieux d'échantillonnage sur le Massif de la « Colle Noire ».

Aucune corrélation entre la composition des échantillons de sol et leur lieu de prélèvement n'est visible. Il ne paraît pas possible, non plus, de relier l'épaisseur de sol mesurées à une valeur d'altitude, d'orientation ou de pente spécifique.

La définition d'une éventuelle corrélation entre les différentes données nécessiterait un échantillonnage plus approfondi (minimum de 50 échantillons répartis de manière organisée dans le bassin versant à l'étude).

2.3. Modélisation hydrologique à l'aide du modèle HEC-HMS : résultats de simulations

2.3.1. Evolution du débit en fonction de l'année

En comparant les simulations réalisées pour 1989, 1999 et 2014 pour un même évènement pluvieux (Fig. 9, 13 et 17 pour P5), il apparaît assez clairement que la courbe de ruissellement reste sensiblement la même dans le temps. Pour les trois années, le ruissellement total (ligne bleue continue sur les graphiques) apparaît à la même heure et avec une valeur de débit identique ($0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ à 10h05 pour l'évènement P5). Le ruissellement de surface (ligne en tirets bleu sur le graphique) est le premier à apparaître ; s'en suit alors une courte période pour que le ruissellement hypodermique ou écoulement en subsurface apparaisse à son tour. On observe une légère diminution du délai d'apparition du ruissellement hypodermique par rapport au ruissellement de surface avec une période de 30 minutes relevée pour 1989 contre 25 minutes en 1999 et 2014. De manière générale, l'allure de la courbe laisse apparaître un pic de ruissellement avec une croissance rapide jusqu'à atteindre une valeur maximale suivie d'une diminution rapide dans la première heure et plus progressive par la suite (Fig. 9 à 20).

Le débit de pointe est observé à 12h20 quel que soit la période de retour de l'évènement et l'année que l'on analyse. Cela peut être relié au pic de pluie présent entre 11h55 et 12h05 dans chaque jeu de données pluviométriques utilisés dans cette étude.

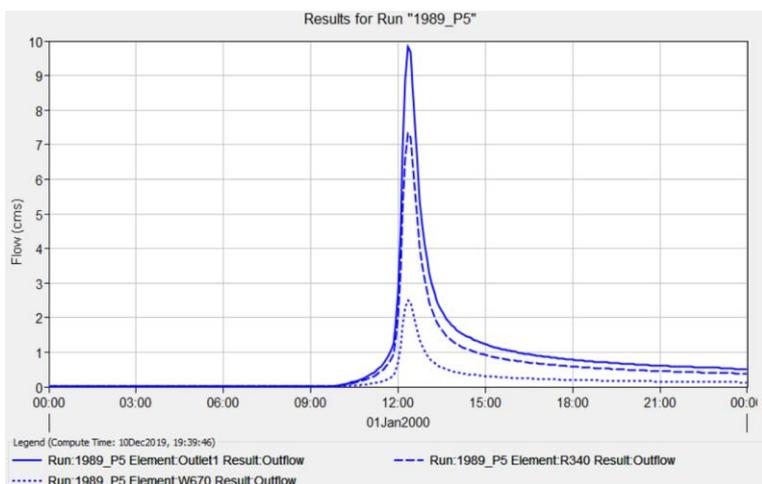


Fig. 9 : Simulation du ruissellement en 1989 à P5.

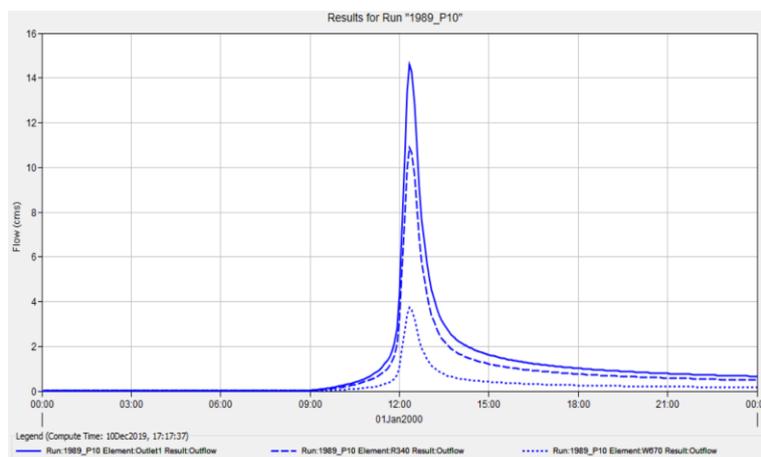


Fig. 10 : Simulation du ruissellement en 1989 à P10.

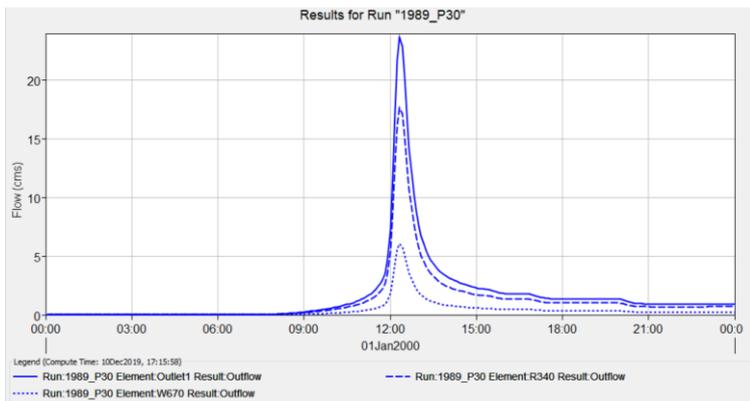


Fig. 11 : Simulation du ruissellement en 1989 à P30.

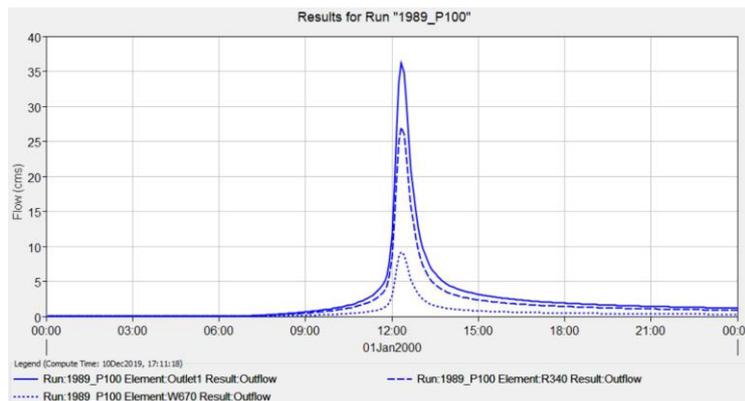


Fig. 12 : Simulation du ruissellement en 1989 à P100.

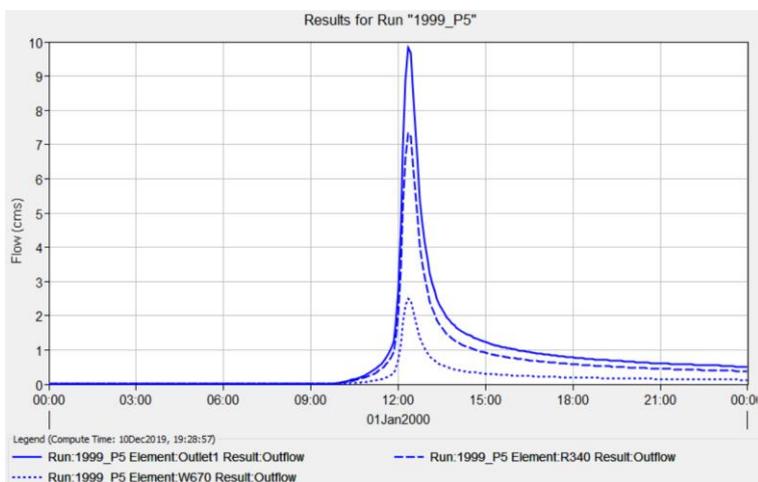


Fig. 13 : Simulation du ruissellement en 1999 à P5.

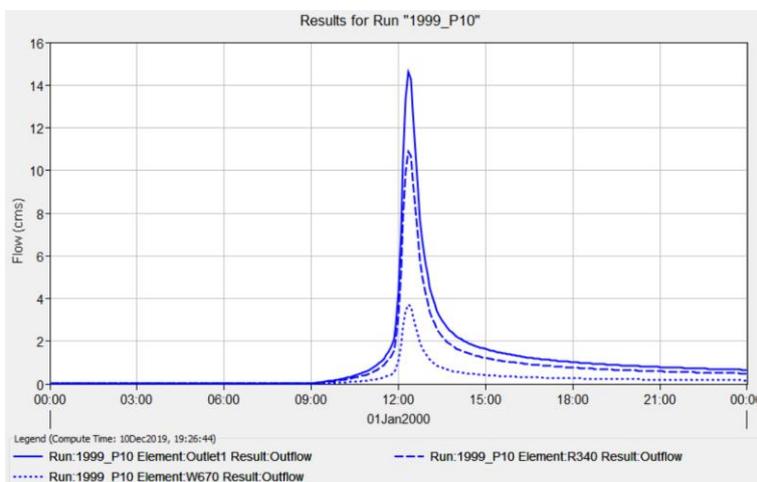


Fig. 14 : Simulation du ruissellement en 1999 à P10.

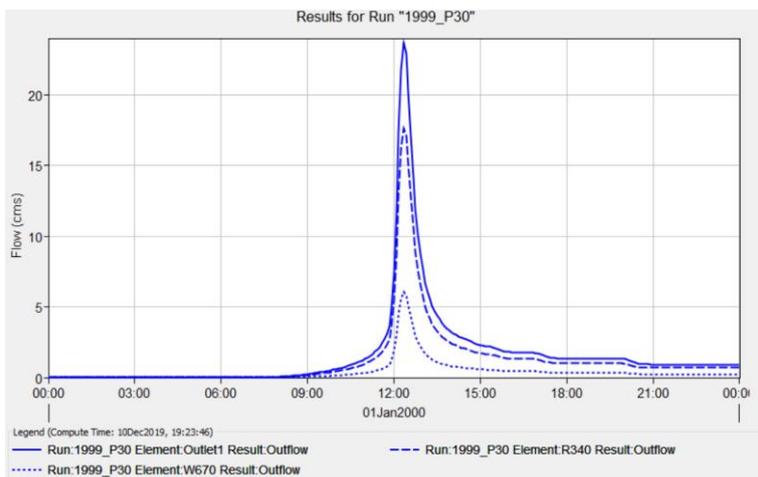


Fig. 15 : Simulation du ruissellement en 1999 à P30.

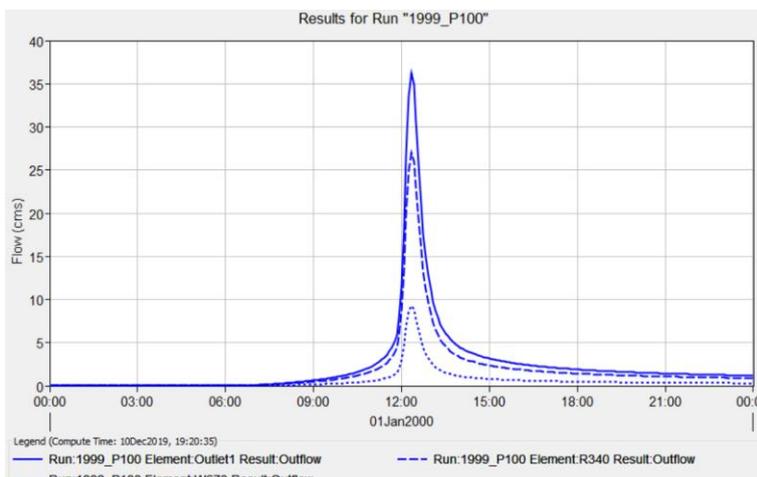


Fig. 16 : Simulation du ruissellement en 1999 à P100.

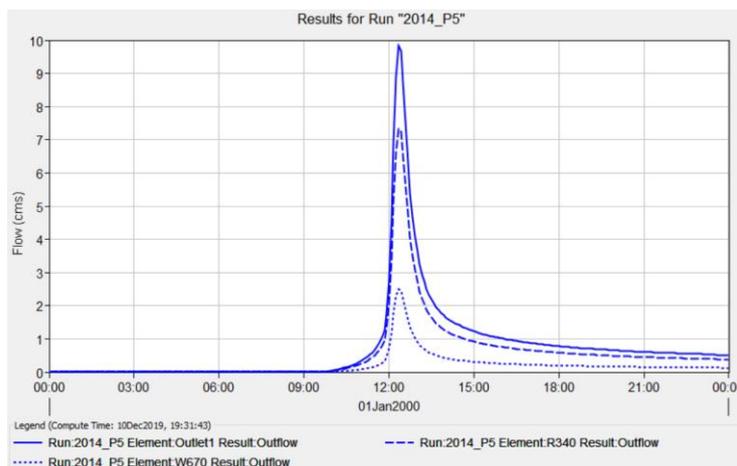


Fig. 17 : Simulation du ruissellement en 2014 à P5.

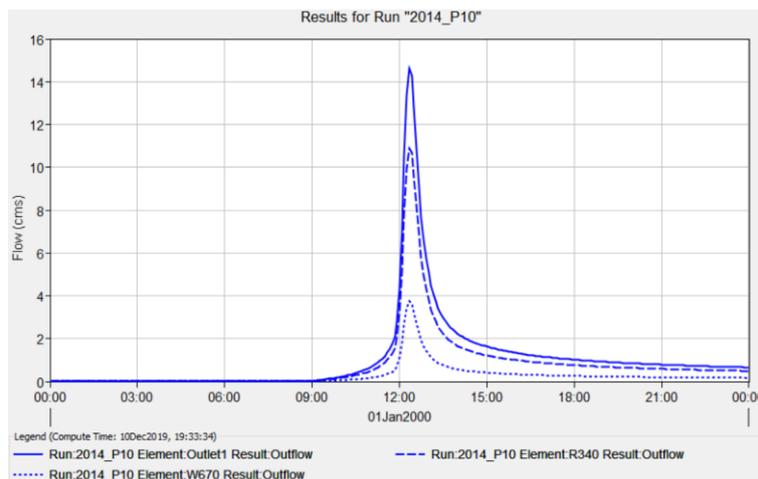


Fig. 18 : Simulation du ruissellement en 2014 à P10.

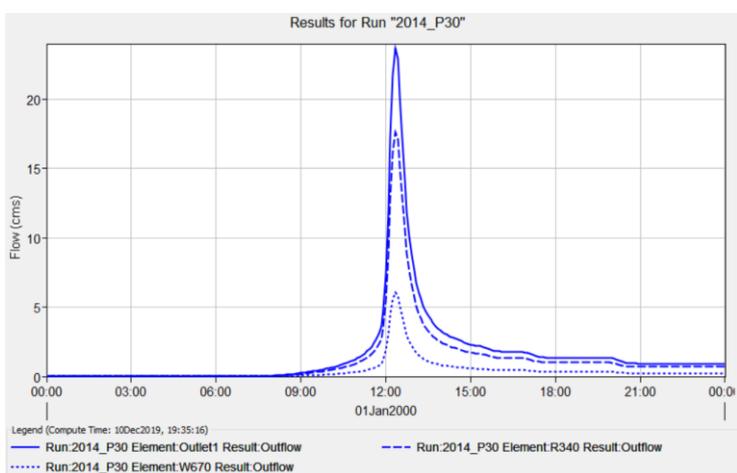


Fig. 19 : Simulation du ruissellement en 2014 à P30.

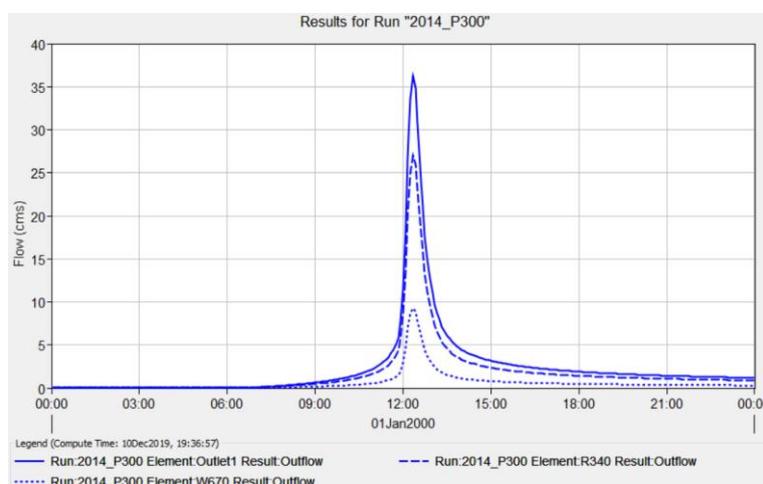


Fig. 20 : Simulation du ruissellement en 2014 à P100.

De la même manière, le tableau 10, recensant les débits de pointe et volumes totaux d'eau ruisselée observés dans chaque simulation, montre que le débit de pointe n'évolue pas dans le temps et que le volume d'eau ruisselée ne connaît qu'une évolution minimale entre 1989, 1999 et 2014. En effet, quel que soit l'année à laquelle on se rapporte, le pic de débit sera de $9,8 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un évènement pluvieux ayant une période de retour de 5 ans (P5) et de $36,2 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un évènement à P100. Le volume d'eau de chaque évènement augmente lui légèrement entre les années (0,01 mm), excepté pour P30 où celle-ci est plus marquée entre 1989 et 1999 qu'entre 1999 et 2014 (augmentation respective de 0,02 mm et 0,01 mm).

Tab. 10 : Synthèse des débits de pointe et des volume d'eau ruisselée répertoriés dans les différentes simulations réalisées dans HEC-HMS.

	1989				1999				2014			
	P5	P10	P30	P100	P5	P10	P30	P100	P5	P10	P30	P100
Débit de pointe (m ³ /s)	9.8	14.6	23.7	36.2	9.8	14.6	23.7	36.2	9.8	14.6	23.7	36.2
Volume (mm)	38.08	53.69	82.11	121.21	38.09	53.70	82.13	121.22	38.10	53.71	82.14	121.23

2.3.2. Evolution du débit en fonction de l'évènement pluvieux

Lorsque l'on compare maintenant les simulations lancées pour une même année mais pour des évènements pluvieux différents, plusieurs variations sont visibles. En effet, si l'on prend l'exemple de 1989, les graphiques des figures 9 à 12 montrent que la diminution du débit du ruissellement en deuxième partie de l'évènement P30 s'avère moins linéaire que pour les autres. D'autre part, on remarque que plus l'intensité de l'évènement pluvieux est importante, plus le débit de pointe est élevé. En effet, lorsque l'on regarde les données pluviométriques pour les différents évènements, on peut voir que plus la période de retour est importante, plus le cumul de pluie est élevé. On aura un cumul de pluie journalier de 108,48 mm avec un pic à 7,69 mm pour un évènement ayant une période de retour de 5 ans (P5) alors que P100 fait référence à un cumul journalier de 213,71 mm avec un pic de 16,97 mm d'eau tombés en 5 minutes (Cf. données).

On relève ainsi dans les simulations, des débits de pointes respectifs de 9,8 m³/s, 14,6 m³/s, 23,7 m³/s et 36,2 m³/s pour P5, P10, P30 et P100 (Tab. 10).

3. Interprétation et discussion

3.1. Impact de l'évolution du bâti en aval de la « Colle Noire » sur le ruissellement

A l'image du reste de la commune du Pradet (G. George et D. Fox, 2019), la zone d'étude (bassin versant recouvrant la partie aval du massif de la Colle Noire) n'est sujette qu'à une faible évolution de son occupation du sol par du bâti entre 1989 et 2014. Cette évolution suit également la même tendance que le reste de la commune et est associée à une décroissance de l'urbanisation entre 1999 et 2014. Cela peut s'expliquer, par la décroissance démographique observée depuis 2011 dans la commune dû à la hausse des valeurs de l'immobilier (INSEE, 2012).

En complément de cela, les résultats montrent une faible densité urbaine et un bassin versant occupé par du bâti diffus, et ce, quelle que soit l'année étudiée. Comme précisé dans le livrable 1 du projet ADAPT, cela s'explique en grande partie par la politique d'aménagement du territoire de la ville du Pradet visant à préserver les espaces agricoles et naturels et à éviter l'étalement urbain non-maitrisé.

La faible urbanisation visible dans notre zone d'étude entre 1989 et 2014 n'induit, de fait, qu'une faible évolution de l'imperméabilisation des sols sur ces 25 années. En analysant les simulations réalisées à partir du modèle hydrologique HEC-HMS prenant en compte les zones plus ou moins imperméabilisées pour chacune des années, il apparaît clairement que l'évolution du bâti n'a qu'un impact négligeable sur le ruissellement dans la zone d'étude.

3.2. Evolution de la vulnérabilité du bâti en aval de la « Colle Noire »

Les douze simulations réalisées à partir du modèle – quatre évènements pluvieux différents (période de retour de 5, 10, 30 et 100 ans) sur les trois années à l'étude (1989, 1999 et 2014) – mettent en avant le fait que seule la variation de l'intensité de l'épisode pluvieux influence réellement le débit de pointe et le volume d'eau du ruissellement au sein du bassin versant. En effet, les résultats montrent qu'aucun changement n'est observé lorsque l'on change d'année, cependant, un ruissellement plus important est visible lorsque que l'intensité des pluies est accrue. Cela est cohérent avec les données entrées dans le modèle pour les différents évènements. De fait, la période de retour, étant ici liée à l'intensité des pluies, a un impact sur le ruissellement ainsi que sur le débit de pointe de ce dernier.

La vulnérabilité du bâti liée à l'imperméabilisation du sol en aval de la Colle Noire n'est donc pas plus importante dans le temps ; seule l'intensité de l'évènement pluvieux aura un impact et augmentera celle-ci.

Conclusion

La très faible évolution du bâti en aval de la « Colle Noire » entre 1989 et 2014 ainsi que le caractère « diffus » de celui-ci n'induit qu'une minime imperméabilisation des sols au sein du bassin versant à l'étude. Par conséquent, l'évolution de l'occupation du sol par du bâti n'a pas eu d'impact significatif sur le ruissellement modélisé dans la zone d'étude. De la même manière, le ruissellement dû à l'imperméabilisation des sols entre 1989 et 2014 n'évoluant pas, son impact sur l'évolution de la vulnérabilité du bâti en aval de la « Colle Noire » est négligeable.

Afin d'estimer au plus près l'imperméabilisation du sol, il serait possible d'intégrer en plus du bâti les surfaces artificialisées telles que les routes et parking par exemple. Ces structures contribuant à l'imperméabilisation du sol, pourraient avoir un impact sur le pourcentage d'imperméabilité calculé et intégré au modèle. En plus du pourcentage d'imperméabilité du sol, des données plus précises d'occupation du sol pourraient également être analysées afin de faire varier la valeur du CN et affiner le modèle. Cependant, les premiers résultats laissent à penser que l'impact sur le ruissellement et la vulnérabilité du territoire face à cette aléa sera sensiblement similaire.

Références

Chow, V. T., D.R. Maidment and L. W. Mays, 1988. Applied Hydrology. McGraw Hill, 572 p.

Commission européenne, 2012. Lignes directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols, 62p. doi : 10.2779/79012

Georges G. et D. Fox, 2019. Livrable 1 - Étude et cartographie de l'évolution du bâti et de l'occupation du sol du Pradet de 1989 à 2014. Projet ADAPT. 37 p.

INSEE Études, Septembre 2012. "Portrait de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur". Dossier N°7. 48 p.

ANNEXES

ANNEXE 1 : TABLE D'AIDE A LA DETERMINATION DU CURVE NUMBER PAR CHOW ET AL.1988.

TABLE 5.5.2
Runoff curve numbers for selected agricultural, suburban, and urban land uses (antecedent moisture condition II, $I_a = 0.2S$)

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

ANNEXE 2 : EVOLUTION DU BATI SUR LA COMMUNE DU PRADET ENTRE 1989 ET 2014.

	Superficie du bâti (m ²)	Evolution du bâti (m ²)	Evolution du bâti (%)
1989	181414		
1999	205441	24027	13.24
2014	215784	10343	5.70