

FRANCE

DEPARTEMENT DES PYRENEES-ORIENTALES

programme et financement



réalisation de l'étude



RAPPORT FINAL

*Evaluation de l'aléa érosion
après un incendie*

octobre 2022

commune de CERBERE

DISPOSITIF EXPERIMENTAL :

objectifs
mise en place
opérationnalisation
résultats
perspectives

Photographie de la page de garde : vue sur la parcelle expérimentale de mesure de l'érosion installée sur la zone incendiée par le feu de végétation du 31 juillet 2021 sur la forêt domaniale de CERBERE (PYRENEES-ORIENTALES)

RESUME EXECUTIF

Dans le contexte global de dérèglement climatique, les périodes de sécheresse sur le pourtour méditerranéen deviennent de plus en plus sévères et durables, et augmentent significativement le nombre d'incendies et les surfaces brûlées. Avec des enjeux toujours plus denses et forts en pied des reliefs, les risques hydrauliques induits après un incendie sont susceptibles d'être aggravés. Cela se traduit par des bassins versants beaucoup plus réactifs, engendrant des inondations et des crues torrentielles plus fréquentes et déclenchées par des pluies de moindres intensités qu'auparavant.

Après l'incendie d'un versant qui domine des enjeux, la modification soudaine du paysage provoque souvent un traumatisme psychologique de la population qui peut conduire à exagérer la perception des risques induits en cas d'épisodes pluvieux. Ce biais de perception peut conduire à vouloir mettre rapidement en place des solutions de restauration des sols incendiés qui se révèlent finalement peu efficaces et coûteuses.

Les processus hydrauliques induits après un incendie, et notamment l'augmentation du ruissellement et de l'érosion des sols, ont fait l'objet de nombreuses études et retours d'expérience à travers le monde, avec des estimations très variées, et pour la plupart difficilement applicables en contexte méditerranéen.

Dans le cadre du projet Européen MONTCLIMA, une première analyse approfondie d'évaluation de l'aggravation potentielle des risques hydrauliques induits a été menée à la suite du feu de 2019 sur la commune de MONZE (AUDE, FRANCE). Cette analyse n'avait pas pour objectif de quantifier précisément les processus hydrauliques, mais plutôt de décrire les mécanismes mis en jeu. Pour compléter cette analyse, nous avons proposé la mise en place d'un dispositif expérimental « d'évaluation de l'aléa érosion après un incendie » destiné à enrichir la connaissance scientifique sur ces processus hydrauliques induits dans un contexte méditerranéen sur des sols incendiés constitués de schistes altérés.

Le principe de ce dispositif expérimental a consisté à instrumenter un versant récemment impacté par un fort incendie de végétation sur un secteur pré-identifié. Le feu de 51 ha qui s'est produit le 31 juillet 2021 sur la crête frontalière dominant la ville de CERBERE a été l'occasion de mettre en place 3 parcelles expérimentales de 100 m² chacune permettant de mesurer les processus hydrologiques et érosifs. A l'aide de la connaissance précise du régime des pluies grâce à l'installation d'un pluviomètre, il a été possible de quantifier les effets de l'incendie par comparaison des volumes ruisselés et sédimentaires entre 2 parcelles incendiées et 1 parcelle témoin végétalisée non parcourue par le feu.

Après une saison de mesure, d'octobre 2021 à septembre 2022, et malgré une pluviométrie globalement déficitaire sur le secteur d'étude, le dispositif expérimental a permis de mettre en avant les résultats suivants :

- les sols incendiés réagissent plus rapidement (dès le début de la pluie) et plus facilement (pour des intensités de pluie moindres) ;
- les sols incendiés produisent une réponse hydrologique à partir d'une intensité pluvieuse de l'ordre de 20 mm/h ;
- les sols non incendiés produisent quant à eux une réponse hydrologique pour une intensité pluvieuse supérieure à 40 mm/h ;
- les taux de ruissellements sont jusqu'à 6 fois supérieurs sur les parcelles d'érosion incendiées par rapport à la parcelle témoin végétalisée ;

- les taux d'érosion sont jusqu'à 14 fois supérieurs sur les parcelles d'érosion incendiées par rapport à la parcelle témoin végétalisée ;
- les taux de ruissellement et d'érosion diminuent avec le temps et en fonction du taux de couverture de la végétation au sol ;
- la dynamique naturelle de recolonisation de la végétation est forte, et au bout de 10 mois la végétation au sol atteint un taux de couverture proche de 70 % à 90 %.

Les résultats de cette expérimentation sont à prendre avec précaution puisqu'ils sont issus de mesures réalisées sur une seule saison hydrologique, dans un contexte de déficit pluviométrique avec peu d'épisodes pluvieux remarquables.

En confrontant ces résultats avec la bibliographie, et en tenant compte de la distorsion d'échelle entre les parcelles expérimentales du projet MONTCLIMA (100 m²) avec des bassins versants incendiés de plus grandes tailles et intégrant des processus hydro-sédimentaires, nous concluons que les incendies peuvent multiplier **jusqu'à un rapport de 2 le taux de ruissellement** en comparaison avec la configuration d'avant l'incendie.

En ce qui concerne les processus érosifs, même si les résultats mettent en évidence une augmentation importante et soudaine, avec un rapport supérieur à 10 du taux d'érosion, il est difficile d'en dégager une tendance sur la seule base de cette expérimentation.

Les modifications du régime hydro-sédimentaire des bassins versants incendiés sont transitoires : sur le dispositif expérimental, la dynamique naturelle de recolonisation de la végétation confère une bonne couverture au sol au bout de seulement 10 mois. Cette dynamique dépend de multiples facteurs, mais la synthèse bibliographique indique qu'au bout **de 3 à 5 ans après le feu, on observe un retour à la normale** pour les processus hydrologiques et sédimentaires.

Cette connaissance de l'évolution temporelle des processus à moyen terme nécessite de poursuivre le suivi du dispositif expérimental au-delà de la fin du projet MONTCLIMA. Le service RTM va assurer un suivi à minima durant la saison hydrologique 2022-2023, en s'associant avec une entité universitaire locale pour capitaliser et actualiser ces connaissances.

Grâce au projet MONTCLIMA, les résultats de l'expérimentation ont été valorisés par le service RTM des PYRENEES-ORIENTALES dans des études opérationnelles sur l'évaluation de l'augmentation potentielle des risques hydrauliques induits des incendies d'OPOUL-PERILLOS et SALSES-LE-CHATEAU (feu du 28 juin 2022) et de CAUDIES-DE-FENOUILLEDES (feu du 15 août 2022).

Il a notamment été possible de formaliser de **manière objective et quantifiée, une doctrine d'intervention après un incendie, avec une temporalité adaptée pour la mise en place d'actions de mitigation des risques hydrauliques induits.**

GLOSSAIRE

Les termes spécifiques utilisés dans le présent rapport sont les suivants :

- **Dispositif expérimental** : ensemble composé de 3 parcelles d'érosion, d'un pluviomètre et d'APN pour confirmer la présence d'écoulement et suivre la recolonisation de la végétation
 - **Pluviomètre** : appareil permettant la mesure en continue de la pluie ; un pluviomètre comporte le pied support et le capot cylindrique (capteur) installé au sommet du pied
 - **Parcelle d'érosion** : ensemble comprenant à la fois
 - une délimitation de terrain d'environ 100 m² à l'aide de bordures ;
 - un collecteur/décanteur des eaux ruisselées ;
 - un canal d'approche avec son appareil de mesure du débit (Hs-Flume) ;
 - un APN pour superviser le matériel.
 - **Bordures** : rigides (planches de bois) ou souples (sac de lestage), elles permettent de circonscrire une surface précise pour l'étude de l'érosion
 - **Décanteur** : bac permettant de recueillir les éléments de sol arrachés par les écoulements (sables et graviers) pour ensuite être mesurés
 - **Canal d'approche** : canal rectiligne qui se situe en amont du Hs-Flume afin de permettre aux lignes de courant de s'aligner dans le sens général de l'écoulement et faciliter la mesure
 - **HS-FLUME** : terme anglais qui désigne l'équipement permettant la mesure de débit (débitmètre). Cet équipement possède une géométrie très spécifique et donne une relation simple entre la hauteur d'eau mesurée et la valeur du débit
 - **APN** : Appareil Photo Numérique permettant de surveiller les équipements et diminuer le risque de vandalisme
-
- **Coefficient de ruissellement** : ratio entre la quantité d'eau qui ruisselle et la quantité d'eau totale précipitée (pluies). Ce ratio est toujours inférieur à 1
 - **Effet splash** : effet des gouttes de pluie qui impactent le sol et arrachent de la matière solide qui est ensuite emportée par le ravinement et contribue à l'érosion des sols
 - **Hydrophobie** : caractéristique d'un sol à devenir imperméable. Dans certaines configurations de sols et de végétation, le feu peut modifier fortement les caractéristiques pédologiques des sols et augmenter leur hydrophobie
-
- **RTM** : Restauration des Terrains en Montagne – service de l'Office National des Forêts spécialisé dans les risques naturels (avalanche, mouvements de terrain, inondation, crue torrentielle)
 - **DFCI** : Défense des Forêts contre l'Incendie – service de l'Office National des Forêts spécialisé dans la prévention contre le risque Feu de forêt

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Badia, D., & Marti, C. (2000). Seeding and mulching treatments as conservation measures of two burned soils in the central Ebro valley, NE Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 14(3), 219-232.
- Ballais, J. L., Bosc, M. C., & Sandoz, A. (1992). La morphogenèse sur la montagne Sainte-Victoire après l'incendie : l'exemple du ruissellement (1989-1992). *Méditerranée*, 75(1), 43-52.
- Ballais, J. L. (1993). L'érosion consécutive à l'incendie d'août 1989 sur la montagne Sainte-Victoire : trois années d'observations (1989-1992) (Erosion resulting from the fire of august 1989 on the Montagne Sainte-Victoire : three years of observations (1989-1992). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 70(5), 423-437.
- Bartet, J. H., & Combes, F. (1984). Remise en valeur d'un territoire incendié, communes de Saint-André-les-Alpes, Angles, Vergons (Alpes de Haute Provence). *Forêt Méditerranéenne*, 6(1), 27-38.
- Bautista, S., Bellot, J., & Vallejo, V. R. (1996). Mulching treatment for postfire soil conservation in a semiarid ecosystem. *Arid Land Research and Management*, 10(3), 235-242.
- Bodí, M. B., Martín, D. A., Balfour, V. N., Santín, C., Doerr, S. H., Pereira, P., ... & Mataix-Solera, J. (2014). Wildland fire ash: production, composition and eco-hydro-geomorphic effects. *Earth-Science Reviews*, 130, 103-127.
- Bonnet, V., & Tatoni, T. (2003). Analyse spatiale et fonctionnelle de la réponse de la végétation après incendie en basse Provence calcaire. *Forêt méditerranéenne*, 24(4), 385-402.
- Booker, F. A., Dietrich, W. E., & Collins, L. M. (1993). Runoff and erosion after the Oakland firestorm. *California Geology*, 46(6), 159-173.
- Cannon, S. H. (2001). Debris-flow generation from recently burned watersheds. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7(4), 321-341.
- Cerdà, A., & Doerr, S. H. (2005). Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an 11-year investigation. *International Journal of Wildland Fire*, 14(4), 423-437.
- Cerda, A. (2009). *Fire effects on soils and restoration strategies* (Vol. 5). CRC Press.
- Combes, F. (1990). Après le feu... la boue. *Revue forestière française*, 42(S), 303-306.
- DeBano, L. F. (2000, March). Fire-induced water repellency: an erosional factor in wildland environments. In *Proceedings of Conference Land Stewardship in the 21st century. The Contributions of Watershed Management* (pp. 307-310). Tucson: AZ.
- Díaz-Fierros, F., Benito, E., & Soto, B. (1994). Action of forest fires on vegetation cover and soil erodibility. *Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires. Geofoma Ediciones, Logroño*, 163-176.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Blake, W. H., Chafer, C. J., Humphreys, G. S., & Wallbrink, P. J. (2006). Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 295-311.
- Hoefen, T. M., Kokaly, R. F., Martin, D. A., Rochester, C. J., Plumlee, G. S., Mendez, G., ... & Fisher, R. N. (2009). *Sample collection of ash and burned soils from the October 2007 southern California Wildfires* (No. 2009-1038). US Geological Survey.
- Kribeche, H., Bautista, S., Gimeno, T., Blade, C., & Vallejo, V. R. (2013). Evaluating the effectiveness of post fire emergency rehabilitation treatments on soil degradation and erosion control in semi-arid mediterranean areas of the Spanish South East. *Arid Land Research and Management*, 27(4), 361-376.
- Lavabre, J., Torres, D. S., & Cernesson, F. (1993). Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *Journal of Hydrology*, 142(1-4), 273-299.

- Lavabre, J., & Martin, C. (1997). Impact d'un incendie de forêt sur l'hydrologie et l'érosion hydrique d'un petit bassin versant. *Human Impact on Erosion and Sedimentation*, (245), 39.
- Martin, C., Bernard-Allée, P., Béguin, E., Levant, M., & Quillard, J. (1993). Conséquences de l'incendie de forêt de l'été 1990 sur l'érosion mécanique des sols dans le Massif des Maures (Repercussions on physical soil erosion in the forests of the "Massif des Maures" following the fire of Summer 1990). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 70(5), 438-447.
- Martin, C., Martin-Decome, A., & Allée, P. (2008). Prédiction de l'érosion hydrique après incendie de forêt dans la partie occidentale du massif des Maures (Var, France). *Etudes de géographie physique*, 35, 51-64.
- Martins, M. A., Machado, A. I., Serpa, D., Prats, S. A., Faria, S. R., Varela, M. E., ... & Keizer, J. J. (2013). Runoff and inter-rill erosion in a Maritime Pine and a eucalypt plantation following wildfire and terracing in north-central Portugal. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(4), 261.
- Mataix-Solera, J., & Guerrero, C. (2007). Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*, 5-40.
- Moody, J. A., & Martin, D. A. (2009). Forest fire effects on geomorphic processes. In *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 57-96). CRC Press.
- Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., Cannon, S. H., & Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Reviews*, 122, 10-37.
- Moody, J. A., & Nyman, P. (2013). *Variations in soil detachment rates after wildfire as a function of soil depth, flow properties and root properties*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Moody, J. A., & Ebel, B. A. (2014). Infiltration and runoff generation processes in fire-affected soils. *Hydrological Processes*, 28(9), 3432-3453.
- Neary, D. G., Ryan, K. C., & DeBano, L. F. (2005). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p., 42.*
- Pietraszek, J. H. (2006). *Controls on Post-fire Erosion at the Hillslope Scale, Colorado, Front Range* (Doctoral dissertation, Colorado State University).
- Prats, S. A., Malvar, M. C., Vieira, D. C. S., MacDonald, L., & Keizer, J. J. (2016). Effectiveness of hydromulching to reduce runoff and erosion in a recently burnt pine plantation in central Portugal. *Land degradation & development*, 27(5), 1319-1333.
- Rey, F., Ballais, J. L., Marre, A., & Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes rendus géoscience*, 336(11), 991-998.
- Shakesby, R. A., & Doerr, S. H. (2006). Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74(3-4), 269-307.
- Thomas, G., Rosalie, V., Olivier, C., & Antonio, L. P. (2021). Modelling forest fire and firebreak scenarios in a mediterranean mountainous catchment: Impacts on sediment loads. *Journal of environmental management*, 289, 112497.
- Vallejo, R., Serrasolses, I., Alloza, J. A., Baeza, M. J., Bladé, C., Chirino, E., ... & Vilagrosa, A. (2009). Long-term restoration strategies and techniques. *Fire effects on soils and restoration strategies. Science Publishers Inc., Enfield*, 373-398.
- Wohlgemuth, P. M., & Robichaud, P. R. (2007). The effects of selected postfire emergency rehabilitation techniques on small watershed sediment yields in southern California.
- Woods, S. W., & Balfour, V. N. (2008). The effect of ash on runoff and erosion after a severe forest wildfire, Montana, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 17(5), 535-548.

SOMMAIRE

1	Les objectifs du projet	1
1.1	L'effet du changement climatique sur l'aggravation des incendies.....	1
1.2	Les incendies aggravent les risques naturels	2
1.3	L'état de la connaissance actuelle sur le ruissellement et l'érosion	4
1.3.1	Modification de l'hydrologie	4
1.3.2	Erosion et ravinement	8
2	La méthodologie utilisée	13
2.1	Les objectifs	13
2.2	L'approche expérimentale	13
2.2.1	Principe de l'instrumentation retenue	14
2.2.2	Choix du site	15
2.2.3	Dimensionnement du dispositif	20
2.2.4	Choix des équipements et instruments.....	29
2.2.5	Mise en place de l'instrumentation	37
2.2.6	Opérationnalisation et maintenance	46
3	Les résultats des mesures.....	49
3.1	Contexte pluviométrique	49
3.2	Augmentation de l'hydrologie.....	51
3.2.1	Données brutes des hauteurs d'eau	51
3.2.2	Hauteurs d'eau dans les Hs-Flume	53
3.2.3	Débits mesurés.....	54
3.2.4	Focus sur l'épisode pluvieux de novembre 2021	55
3.2.5	Résultats sur un autre incendie à proximité	58
3.2.6	Conclusions sur l'hydrologie.....	61
3.3	Aggravation de l'érosion	61
3.3.1	Résultats des mesures expérimentales.....	61
3.3.2	Qualification de l'érosion : dynamique naturelle de recolonisation de la végétation..	64
3.4	Réserves sur l'interprétation des résultats	70
4	Les enseignements et les suites du projet	71

1 LES OBJECTIFS DU PROJET

1.1 L'EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'AGGRAVATION DES INCENDIES

Ces dernières années, « les augmentations régionales de la température, de l'aridité et de la sécheresse ont augmenté la fréquence et l'intensité des incendies », avec une extension spatiale qui va bien au-delà des régions jusqu'alors couramment impactées. Au cours des prochaines décennies, « le réchauffement planétaire de 2°C et les changements associés dans les précipitations devraient augmenter de 35 % (confiance moyenne) la superficie mondiale des terres brûlées par des feux de forêt. » (source : Intergovernmental Panel on Climate Change – Working Group II ; contribution to the Sixth Assessment Report)

En asséchant la végétation, le changement climatique entraîne une augmentation du danger météorologique¹ de feux de forêts et un allongement de la saison des feux. Les chercheurs de METEO-FRANCE² ont étudié l'évolution de cet aléa au cours du siècle passé et pour les prochaines décennies : il augmente depuis les années 1960 et devrait encore augmenter au cours du XXI^{ème} siècle. En particulier sur le bassin méditerranéen, tous les modèles climatiques simulent un assèchement. Cette zone est ainsi définie comme un « hotspot » du changement climatique dans le dernier rapport du GIEC.

L'évolution et les modélisations de l'IFM de 1958 à l'horizon 2100 montrent une augmentation constante de la fréquence des jours présentant un danger météorologique de feux de forêts, ainsi qu'un allongement de la saison propice aux incendies (elle débiterait plus tôt au printemps pour se terminer plus tardivement en automne). L'extension des territoires exposés à ce danger devrait également progresser vers le nord de la France.

La valeur moyenne de l'IFM a augmenté de 18 % entre la période [1961-1980] et la période [1989-2008]. À l'horizon 2040, l'IFM moyen devrait progresser de 30 % par rapport à la période [1961-2000]. Certaines simulations montrent que cette augmentation pourrait atteindre jusqu'à 75 % d'ici 2060. À cette échéance, une année comme 2003 deviendrait ainsi la norme en matière de danger météorologique de feux de forêts.

Les chercheurs de METEOFRANCE ont croisé cette évolution du danger météorologique de feux avec les cartographies de vulnérabilité aux feux de forêts des principaux peuplements forestiers, établies par l'Office national des forêts (ONF) et l'Inventaire forestier national (IFN). Des cartes de sensibilité

¹ l'indice de Feu Météorologique (IFM) est représentatif du danger météorologique associé aux feux de forêts.

L'IFM permet d'estimer le danger météorologique de feux de forêts en tenant compte de la probabilité de son éclosion et de son potentiel de propagation. METEOFRANCE évalue quotidiennement l'IFM sur tout l'Hexagone. Cet indice est calculé à partir de données météorologiques simples : température, humidité de l'air, vitesse du vent et précipitations. Ces données alimentent un modèle numérique qui simule l'état hydrique de la végétation et le **danger météorologique d'incendie** qui en découle. Les observations et les prévisions météorologiques permettent de calculer un IFM au jour le jour. Les projections climatiques permettent, quant à elles, d'étudier son évolution à plus long terme.

² extrait publication METEOFRANCE : <https://meteofrance.com/le-changement-climatique/observer-le-changement-climatique/changement-climatique-et-feux-de-forets>

potentielle aux incendies de forêts estivaux aux horizons actuel [1989-2008] et moyen terme [2031-2050] ont ainsi été établies.

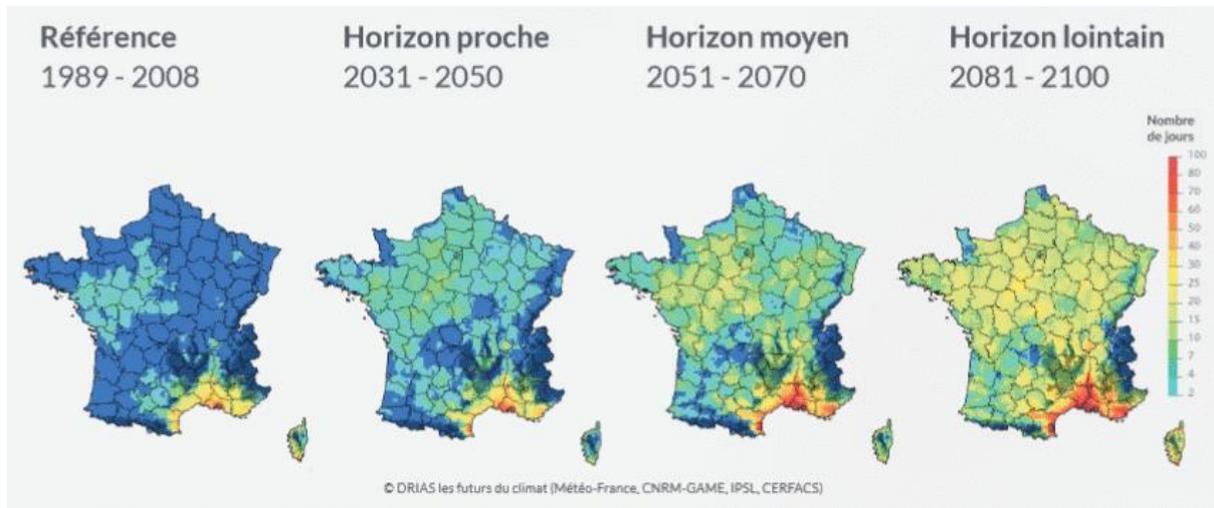


Figure 1 : nombre de jours avec indice de feu météorologique supérieur à 40 (scénario à émissions fortes)

1.2 LES INCENDIES AGGRAVENT LES RISQUES NATURELS

Après un incendie de végétation, sur des terrains montagneux, les aggravations potentielles concernent les risques suivants (Extrait du document DGPR, ONF-2021 : Synthèse des études post-incendie de forêt et bilan des méthodologies) :

❖ Risque de chutes d'arbres

Le feu provoque la mort ou l'affaiblissement des arbres, ce qui augmente fortement le risque de chutes d'arbres. Ce risque est avéré dès que les zones boisées ont été atteintes par un feu de sévérité moyenne ou forte. Le plus souvent, les arbres tombent quelques mois, voire quelques années, après que le feu eut entraîné leur mort par échauffement des parties vivantes (méristèmes), accentué par une dégradation par différents décomposeurs (entomofaune et champignons en particulier). Dans le cas d'arbres déjà partiellement morts ou desséchés, la chute d'arbre se produit pendant le feu ou immédiatement après le feu.

La chute d'arbres peut entraîner l'aggravation d'autres risques (érosion, chutes de blocs, crue torrentielle, avalanche).

❖ Risque de chutes de blocs et de pierres

Dans les zones de départ, l'incendie a pour effet de faciliter la mise en mouvement des blocs par effet combiné de la déstructuration des sols par la chaleur et de l'accroissement de l'érosion inhérente à la perte du couvert végétal.

Dans les zones de propagation des blocs, la destruction ou l'endommagement de la forêt par le feu peut faire perdre brutalement la fonction d'écran de protection et par conséquent augmenter fortement la probabilité d'atteinte des enjeux.

Les ouvrages de protection peuvent être également endommagés, diminuant leur efficacité à réduire la probabilité de départ des pierres et blocs (ouvrages actifs) ou d'atteinte des enjeux (ouvrages passifs) : les ouvrages en bois peuvent être totalement détruits, les murets en pierres sèches déstabilisés, les ouvrages en béton ou métal peuvent avoir subi des dégradations par

effets thermiques, avec l'apparition de problèmes sur les ancrages et sur la résistance et la durabilité des matériaux.

❖ **Risque de ravinement et d'érosion**

Pendant un incendie, la chaleur déstructure le sol superficiel et détruit la litière végétale et la strate herbacée, ce qui favorise la genèse des phénomènes d'érosion et de ravinement. Par ailleurs, la couche de cendres déposée sur le sol pendant l'incendie est extrêmement mobilisable, et de fait, emportée dès les premières pluies. C'est surtout la première année après l'incendie, voire jusqu'à la troisième année, que les phénomènes d'érosion et de ravinement se produisent. Passé ce délai, la fraction la plus déstructurée du sol a déjà été lessivée et la strate herbacée et arbustive est de nouveau présente pour protéger les sols.

Ces phénomènes post-incendie peuvent alors avoir deux types de conséquences :

- sur les risques naturels : l'érosion et le ravinement entraînent des processus d'engravement des fonds de thalwegs et d'affouillements dans les versants, ainsi que sur les pistes. De manière indirecte, l'érosion favorise le départ des pierres et des blocs, qui seront mobilisés ultérieurement pendant les crues torrentielles.
- sur l'environnement : les sols sont non seulement un réservoir important de biodiversité et de carbone, mais également un substrat du développement de toute la biosphère locale. Bien que peu visible, les incendies impactent très fortement les écosystèmes (direct par les flammes, puis indirect par l'érosion). Ces impacts sont d'autant plus graves que les feux sont intenses et/ou fréquents ; dans ce cas, les écosystèmes sont de plus en plus dégradés (garrigues ou maquis monospécifiques, pelouses, éboulis, déserts).

❖ **Risque d'inondation et de crue torrentielle**

La destruction du couvert végétal et la fragilisation des sols par l'incendie aggravent considérablement les processus de ruissellement et de ravinement et donc le risque d'inondation et de crue torrentielle, y compris très en aval des bassins versants concernés par le feu. Les dommages post-incendie se manifestent généralement aux endroits déjà problématiques (ouvrages en travers, ponts, buses, sections hydrauliques restreintes, zones de divagation, etc.).

La formation d'embâcles des bois calcinés en bordure du réseau hydrographique est un facteur aggravant.

C'est pendant les premiers épisodes pluvieux après l'incendie que le transport solide est le plus important (départ des cendres et de la fraction supérieure du sol désagrégé par le feu). Il est donc primordial d'évaluer ce risque très rapidement, avant la période automnale des précipitations intenses méditerranéenne. Ce risque s'estompe dès lors qu'est reconstitué un couvert d'au moins 50 % de la surface incendiée, soit de manière artificielle (mulching, paillis) ou le plus souvent naturel (herbacées, rejets ou semis d'essences arbustives ou arborées...).

❖ **Risque d'avalanche**

Dans les zones de départ d'avalanche, la destruction par incendie des peuplements forestiers de protection est de nature à augmenter considérablement le risque d'avalanche (avalanche plus fréquente et avec des volumes importants). L'incendie peut également endommager et fragiliser les ouvrages paravalanches quel que soit le matériau (métallique, béton armé, bois, pierre).

1.3 L'ETAT DE LA CONNAISSANCE ACTUELLE SUR LE RUISSELLEMENT ET L'EROSION

Pour cette étude de cas, nous nous intéressons **uniquement aux phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols** après un incendie.

1.3.1 MODIFICATION DE L'HYDROLOGIE

1.3.1.1 DESCRIPTION DES PROCESSUS

Dans un bassin versant, les écoulements sont des plusieurs types :

- Les **écoulements « lents » souterrains** qui représentent la part infiltrée de l'eau de pluie transitant lentement dans les nappes vers les exutoires ;
- Les **écoulements « rapides » de surface** qui concernent essentiellement les processus de ruissellement de surface et les écoulements de subsurface. Le ruissellement est constitué par la frange d'eau qui après une averse s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols. L'importance de l'écoulement superficiel dépend de l'intensité des précipitations et de leur capacité à saturer rapidement les premiers centimètres du sol, avant que l'infiltration et la percolation, phénomènes plus lents, deviennent prépondérants.

Après une interception éventuelle par la végétation, il y a un partage de la pluie disponible au niveau de la surface du sol entre l'eau qui s'infiltré et qui contribue, par un écoulement plus lent à travers les couches de sol, à la recharge de la nappe et au débit de base, et celle du ruissellement de surface dès lors que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol (elle-même variable, entre autres selon l'humidité du sol).

Cet écoulement de surface, où l'excès d'eau s'écoule par gravité le long des pentes, forme l'essentiel de l'écoulement rapide de crue. Le ruissellement de surface est d'autant plus prédominant par rapport à l'infiltration que les pentes sont fortes.

L'écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration du sol (écoulement dit Hortonien) est considérée comme pertinent pour expliquer la réponse hydrologique des bassins en climats semi-arides (cas du contexte méditerranéen) ainsi que lors de conditions de forte intensité pluviométrique.

Le pourcentage d'interception de la végétation varie en fonction des conditions climatiques, il diminue avec l'intensité des précipitations. A l'échelle d'une averse, l'interception est meilleure s'il s'agit de pluie fine et faible plutôt qu'une pluie de type orageux.

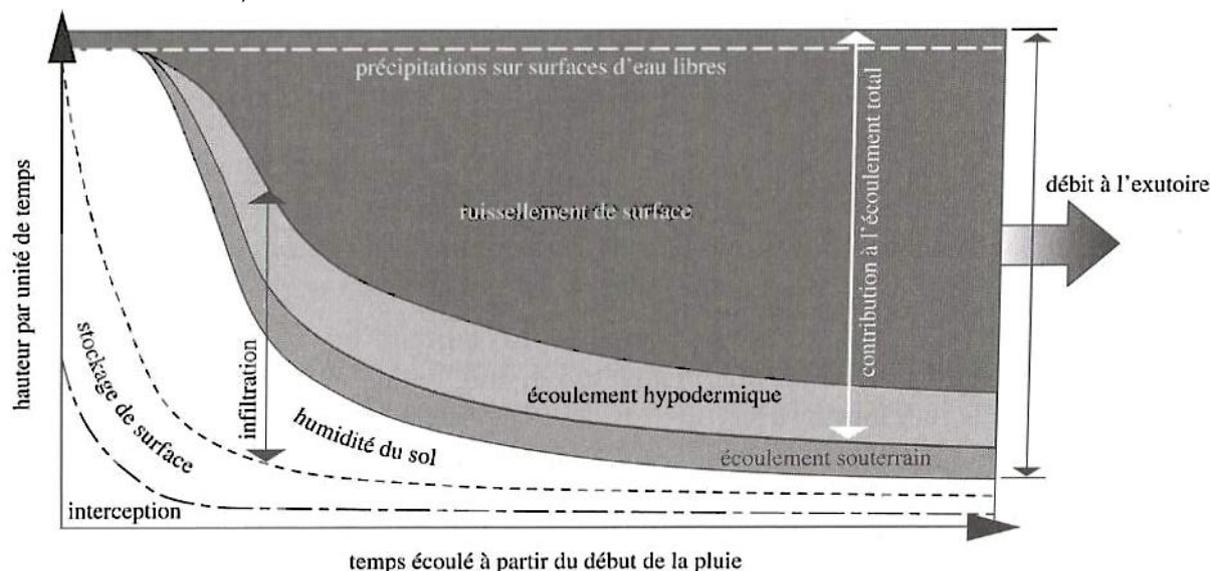
Ce sont pour les petites pluies (<15 mm) et des précipitations de faible intensité que les pertes d'interception du feuillage sont les plus élevés (50% environ des pluies). Pour des pluies abondantes (>15 mm), les pertes d'interception diminuent à 10-20 % par rapport aux précipitations.

Les pertes par interception peuvent être moindre lorsque les feuillages sont secoués par des vents violents. Ainsi, les quantités d'eau écoulée le long du tronc et la précipitation au sol augmentent avec l'intensité des précipitations et la vitesse du vent ; la capacité de stockage du feuillage n'est pas constante.

La perte de végétation après un incendie a deux conséquences :

- la strate forestière : l'absence de forêt conduit à une augmentation de la pluie efficace de l'ordre de 10-20 %.
- la strate végétale au niveau du sol : le rôle de la végétation contribue à un ralentissement de la dynamique hydrologique. En l'absence de végétation au sol, la réponse hydrologique est beaucoup plus rapide, voire impulsionnelle sur les petits bassins versants.

Figure 2 : répartition de la hauteur de précipitations au cours d'une averse d'intensité constante (d'après Révéniéras, 1976) – extrait page 198 de l'ouvrage « Hydrologie I – une science de la nature ; une gestion sociétale », A. Musy, C. Higy, E. Reynard – éditions Presses polytechniques et universitaires romandes)



La *Figure 2* résume bien la contribution temporelle des différents types d'écoulements qui participent à la formation d'un débit à l'exutoire d'un bassin versant naturel.

L'*interception* (végétation arborée) et le *stockage de surface* (micro-topographie, végétation au sol) sont importants pour les faibles pluies. Pour les pluies intenses générant des épisodes de crues, leur rôle devient secondaire. Ce rôle est encore plus marginal en cas de disparition de la végétation par le feu. La quantité d'eau impactant le sol est alors augmenté jusqu'à 20% par rapport à une configuration sans feu.

La part d'*humidité du sol* est d'autant plus importante que les sols sont profonds. Dans les sols du pourtour méditerranéen, on retrouve très souvent des sols peu profonds, pour lequel l'humidification du sol atteint un niveau de saturation assez rapidement après le début de la pluie.

En contexte méditerranéen, la part du *ruissellement de surface* est prépondérant, surtout pour les pluies intenses. A la suite d'un incendie, ce ruissellement est encore plus important et intervient plus rapidement après le début de la pluie.

1.3.1.2 IMPACT D'UN INCENDIE SUR L'AUGMENTATION DES CRUES (FREQUENCE ET DEBIT)

Un feu de végétation modifie très souvent l'hydrologie d'un bassin versant car il change les paramètres d'entrée :

- La forte diminution de l'effet d'**interception** des houpiers du fait de leur disparition (et plus généralement de la végétation) génère une **pluie efficace** qui possède un volume plus important par rapport à une configuration avec végétation ;
- Le **coefficient de ruissellement** est augmenté car l'occupation du sol est fortement modifiée : la disparition de la végétation rase ne permet plus de ralentir les écoulements qui s'écoulent préférentiellement selon la pente plutôt que de s'infiltrer partiellement dans le sol ;
- L'**hydrophobie** potentielle du sol³ (**croûte de battance** générée par la percolation des cires organiques issue de la combustion des végétaux) qui réduit fortement la capacité d'infiltration dans le sol ;
- L'**effet « splash »** des gouttes de pluies qui impactent fortement le sol, aggravé par l'absence d'interception des précipitations. Cet effet « splash » contribue à former la croûte de battance, réduisant alors considérablement le potentiel d'infiltration du sol : tandis que dans un sol non poreux et meuble l'infiltration est de l'ordre de 30-60 mm/h, avec une croûte de battance, cette infiltration est très réduite et atteint des valeurs de l'ordre de 2-6 mm/h, c'est-à-dire 10 fois moins ;
- L'**entraînement de la couche d'humus** dans le cas d'un feu de litière qui réduit d'autant les capacités de rétention des eaux précipitées, et aggrave ainsi le ruissellement (*Combes 1990*) ;
- La diminution du **temps de concentration** des écoulements du fait de l'augmentation des vitesses d'écoulements sur des terrains dépourvus de végétation.

Les enseignements issus des bassins versants expérimentaux sur le *Rimbaud* (sous bassin versant de 1,46 km² du *Réal Collobrier*, département du VAR, *LAVABRE (1992, 1996, 1997)*) permettent de mieux appréhender l'évolution des phénomènes de ruissellement, et leur traduction sur le régime hydrologique.

Ainsi, à la suite d'un incendie en aout 1990, la disparition de près de 85 % du couvert végétal de type méditerranéen (maquis arbustif, forêt de liège, châtaigniers, pins maritimes sur sols de type gneiss altérés, sols fins et sablonneux) du petit bassin versant *du Rimbaud* instrumenté et observé par le CEMAGREF depuis 1967, a permis de mettre en évidence :

- Un **entraînement des sédiments** bien que le ruissellement superficiel n'ait généré que des amorces de rigoles de quelques mm à quelques cm de profondeur ; aucun sapement de berge n'a été observé par ailleurs ;
- une **augmentation des débits de pointe** : le débit de la période de retour de 10 ans (estimé avant l'incendie) a été dépassé trois fois au cours de l'année post-incendie, avec des normales pluviométriques dans la moyenne. Paradoxalement, ces débits ne sont pas associés à des événements pluvieux intense. Le suivi de la pluviométrie et de l'hydrométrie a permis de conclure sur le fait qu'après l'incendie, une pluie de période de retour de 1 an

³ Le phénomène d'hydrophobie est très souvent mentionné dans les études anglosaxonnes sur des grands feux de conifères et sur des sols homogènes avec une fraction limoneuse importante. En contexte méditerranéen, sur des sols plutôt grossiers et graveleux, ce phénomène d'hydrophobie paraît moins prégnant. Une fiche action DGPR 2022-2023 est en cours de rédaction pour évaluer la pertinence de prendre en compte ce phénomène.

est suffisante pour générer un débit de pointe de période de retour 10 ans (estimé avant feu).

Une **diminution du temps de concentration des écoulements**. Après l'incendie, la réponse hydrologique du bassin est devenue impulsionnelle. La réponse au ruissellement du bassin est quasi-concomitante avec les pluies. La décrue est elle aussi beaucoup plus rapide qu'auparavant. Cependant, en quelques années de reprise de la végétation après l'incendie (2 ans environ), cet effet avait disparu.

- une **augmentation des coefficients de ruissellement**. Dans un contexte méditerranéen (Réal Collobrier, Lavabre 1992), le taux d'écoulement annuel sur les zones parcourus par un feu peut être augmenté de **25 % à 30 %** par rapport à la situation de référence avant feu.

L'étude de Lavabre (1992, 1997) - *Figure 3* - montre même qu'une augmentation des débits pour les pluies 24h inférieure à 100 mm (typiquement une pluie décennale) peut se produire avec un facteur jusqu'à 3 entre les valeurs de débits avant l'incendie et après. En revanche pour les fortes pluies, il n'y a pas d'incidence marquée sur les débits.

Ces résultats peuvent être entachés des plusieurs biais d'interprétations :

- pour les fortes pluies (> 100 mm) : le nombre de données est très faible en situation post-incendie ; on n'a finalement que 2 épisodes de pluies pour construire une tendance. Par ailleurs on observe un effet seuil de la réponse hydrologique avant incendie à partir d'une pluie journalière de 140 mm.
- Pour les moyennes et faibles pluies (< 100 mm) : la comparaison est faite avec des pluies journalières. Or, pour ce petit bassin versant (1,46 km²), le ruissellement est très lié à l'intensité maximale des précipitations. En effet, 100 mm de pluie tombés en 1 journée provoqueront beaucoup moins de ruissellement que 100 mm de pluie tombés en quelques heures. Comme la *Figure 3* ne fait pas cette distinction, le **facteur de 3 est à prendre comme un maximum** car on ne sait pas si on compare des grandeurs comparables.

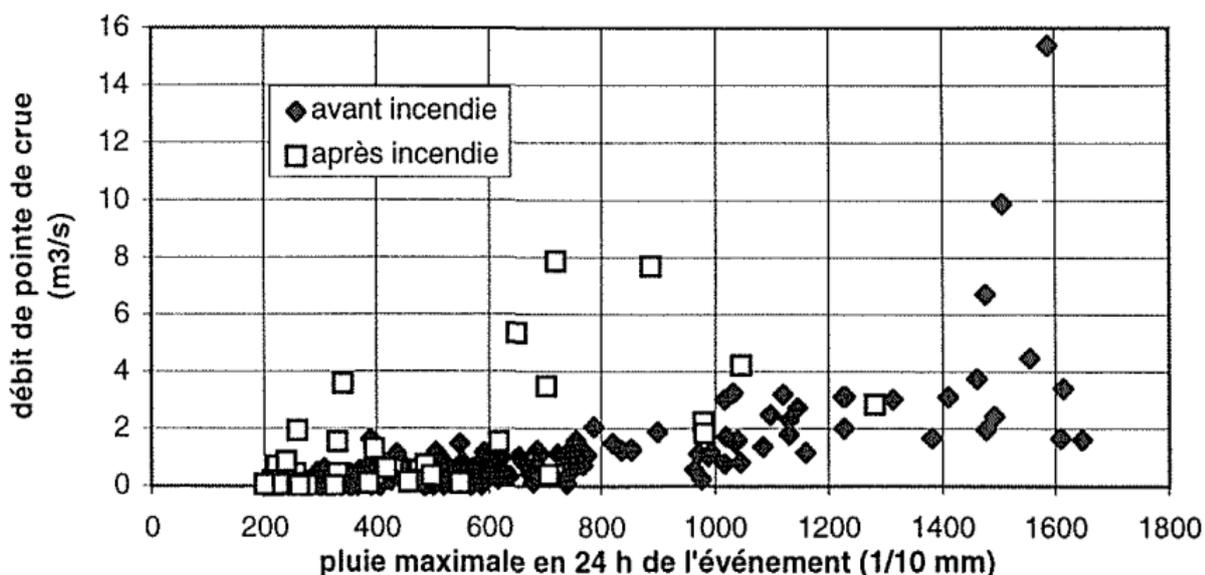


Figure 3 : relation entre les débits de pointe de crue et la pluie en 24 h ayant occasionné la crue – extrait de Lavabre, 1997

Effet, le ruissellement est d'autant plus important que la pluie est intense : il y aura plus de ruissellement suite un orage bref et violent plutôt qu'avec une pluie longue peu intense (Combes, 1990 « Après le feu...la boue »).

Une autre étude (Shakesby 2006) tempère l'augmentation des débits pour les fortes pluies, en l'estimant à 30 %. Cela s'explique logiquement par le fait que pour les fortes pluies, il y a déjà une forte proportion de la lame d'eau précipitée qui est ruisselée (c'est d'ailleurs cette effet seuil observé sur la Figure 3).

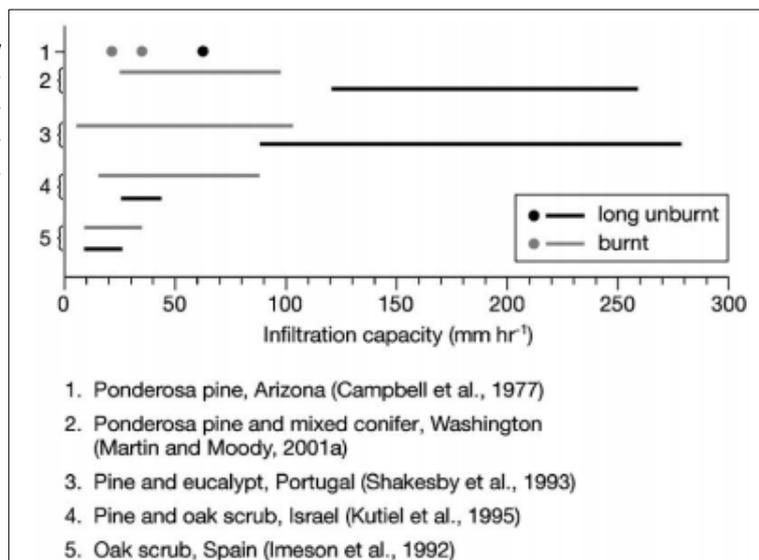
La Figure 4 illustre la comparaison du ruissellement avant/après un incendie en fonction du type de végétation. En revanche, ce graphique ne donne pas d'information sur la sévérité du feu.

Par exemple, pour une formation de Pins en Arizona (1), on passe d'une capacité d'infiltration de l'ordre de 60 mm/h avant feu à 35 mm/h après feu.

Dans des formations de chênes verts en Espagne, on obtient une capacité d'infiltration de quasiment constante. L'impact du feu sur l'augmentation du ruissellement n'est donc pas démontré dans ce cas.

Dans les peuplements de conifères de l'Etat de Washington, l'impact du feu paraît très fort sur la modification de la capacité d'infiltration (du simple au triple) :

Figure 4 : capacités d'infiltration mesurées après un feu de forêt et sur des terrains comparables non brûlés, selon différents auteurs. Les lignes représentent des fourchettes de valeurs et les points représentent des valeurs individuelles - extrait de Shakesby, 2006



1.3.2 EROSION ET RAVINEMENT

1.3.2.1 MECANISMES DE DESTRUCTURATION DU SOL

Le feu, selon son intensité, va modifier les propriétés du sol de plusieurs manières :

1. **La constitution d'un tapis de cendres sur la surface du sol.** Selon l'intensité du feu, les cendres produites peuvent être soit noires sur une épaisseur souvent inférieure à 1 cm (charbons formés pendant un feu peu intense), soit blanches-grises sur des épaisseurs pouvant atteindre jusqu'à 20 cm (cendres fines et légères issues d'une forte intensité de feu). Les cendres modifient différemment la porosité du sol sous-jacent : les cendres noires, plutôt grossières, restent poreuses et ne forment pas d'écran au-dessus du sol. A contrario, les cendres grises, très fines, colmatent plus rapidement et efficacement les interstices du sol (Woods, 2008).

2. **La modification de l'imperméabilité de la strate supérieure du sol** (sur une profondeur généralement inférieure à 6 cm) par la formation d'une couche hydrophobe (MAC DONALDS, 2009). Le caractère hydrophobe du sol provoqué par le feu est souvent la principale cause de l'augmentation du ruissellement. La température du feu est un facteur critique dans l'augmentation du caractère hydrophobe du sol post-incendie (DOERR, 2006). Dans le cas d'un sol à texture grossière, profond et couvert par une végétation de type maquis⁴ et/ou de conifères, l'impact du feu (pendant une durée comprise entre 5 et 20 minutes) est le suivant :
 - Si la température du sol reste en dessous de 175°C, le feu modifie assez peu la composition du sol et il ne devient pas plus hydrophobe qu'avant ;
 - Si la température du sol atteint des valeurs comprises entre 175 °C et 200 °C, la matière organique se transforme en cire qui colmate les interstices du sol, augmentant de manière considérable le caractère hydrophobe du sol. Le taux de ruissellement augmente alors fortement ;
 - Si la température atteint 280°C - 300 °C, voire davantage, il se produit une désagrégation de la couche supérieure du sol et la couche hydrophobe se constitue en dessous.

3. **L'altération de la structure du sol en surface.** En comparaison, le feu agit 10 à 100 fois plus intensément que le gel sur le long terme pour fracturer les roches (SHAKESBY, 2006). Les sols brûlés deviennent friables et nettement moins cohésifs, ce qui génèrent une quantité importante de matériaux fins (COMBES, 1990) qui peuvent être entraînés par les pluies de moyennes et fortes intensités. Les incendies les plus intenses peuvent détruire au moins 80% de la couche de surface et de la litière (MAC DONALDS, 2009).

La [Figure 5](#) résume bien ces mécanismes de dégradation du sol à la suite d'un incendie.

- ❖ Dans le cas (A) d'un sol à tendance plutôt imperméable (fortement hydrophobe) et non parcouru par le feu, la litière forestière favorise la rétention d'eau, tout comme les fissures et les cheminements préférentiels induits par les systèmes racinaires. L'eau de pluie ainsi retenue ne permet pas d'entraîner fortement les éléments en surface ;
- ❖ Après le passage d'un feu de faible à moyenne intensité (B), la litière a été consumée, libérant des cires organiques qui viennent colmater les cheminements préférentiels des fissures et systèmes racinaires. Le sol devient encore davantage hydrophobe. Il n'y a plus de litière en surface pour tamponner les impacts des gouttes de pluie et le risque d'entraînement des éléments fins devient important.
- ❖ Le passage d'un feu de forte intensité va provoquer les mêmes dommages qu'un feu de moyenne intensité, et va en plus « cuire » la strate superficielle du sol. Tant que l'intensité pluvieuse reste modérée (C), le sol cuit, qui est devenu mouillable, va tamponner les écoulements et limiter l'entraînement de matière. En revanche, dès que les ruissellements deviennent trop importants (D), le sol mouillable est entraîné, érodant alors des volumes importants d'éléments fins.

⁴ L'étude DOERR 2006 porte sur des sols de type « chapparral » qui est une sorte de maquis formé par des buissons et des broussailles que l'on trouve en Californie, au nord-ouest du Mexique, dans les pourtours de la Méditerranée. Cet écosystème appartient à la catégorie des forêts, zones boisées et maquis méditerranéens.

La littérature de donne pas d'ordre de grandeur de la lame d'eau précipitée qui permet de passer de la situation (C) à la situation (D).

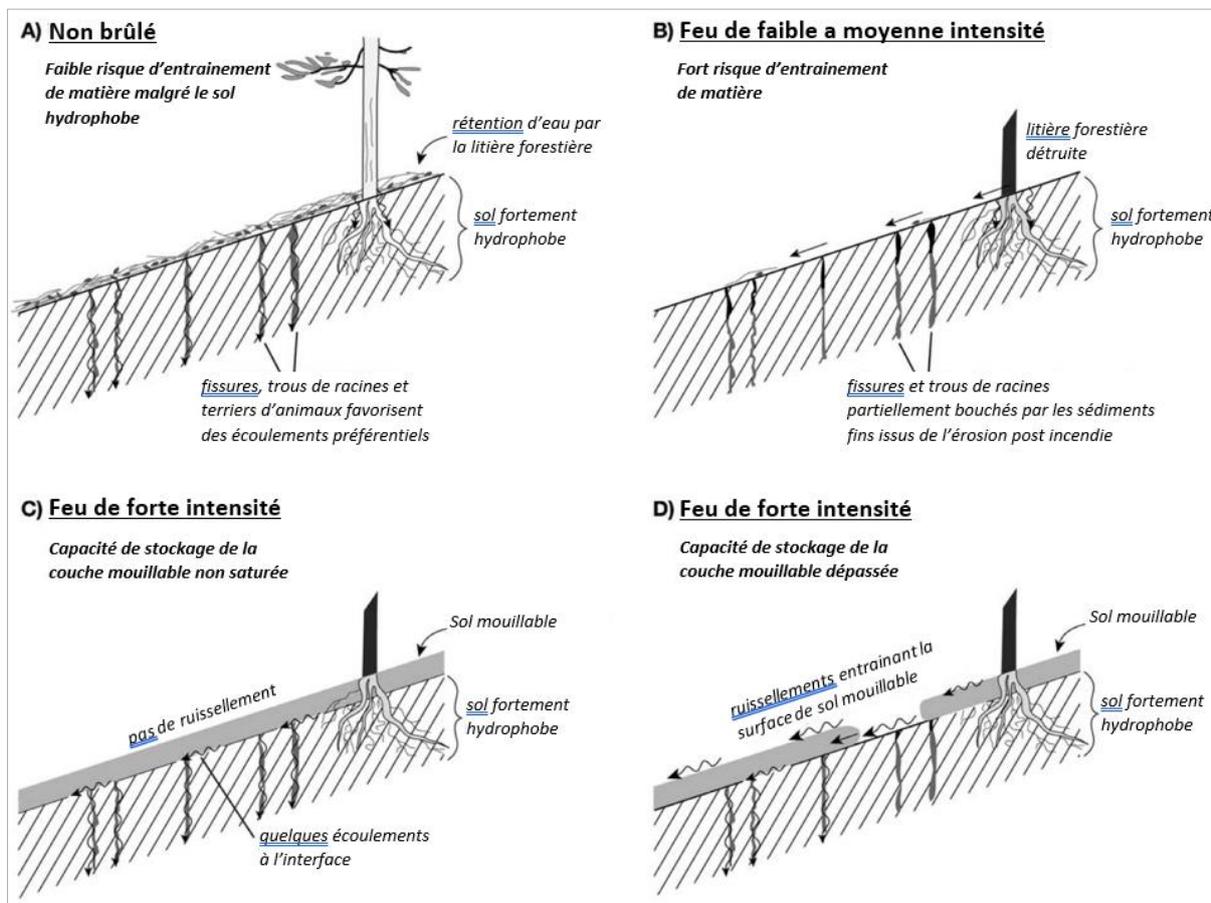


Figure 5 : modifications structurales et hydrologiques du sol après le passage d'un feu ; (A) état de référence sans feu ; (B) comportement du sol après le passage d'un feu de faible à moyenne intensité ; (C et D) conditions sévères de feu.

1.3.2.2 CONSEQUENCES SUR L'ÉROSION ET LE RAVINEMENT

Le degré d'érosion d'un sol est dépendant de multiples facteurs et notamment :

- ❖ Le **niveau de déstructuration du sol** induit par la chaleur de l'incendie (cette déstructuration étant elle-même fortement liée à la géologie, à la couverture végétale, au relief, aux conditions hydriques préalables, ...) ;
- ❖ L'**agressivité des pluies** : effet « splash », cumul des pluies et intensités horaires.

A la suite d'un incendie, l'absence de houppier réduit considérablement l'interception de la pluie par les arbres. L'impact direct des gouttes de pluie sur le sol contribue à un important effet « splash » sur le sol, qui est d'autant plus important que les pluies sont d'origine orageuse (Pietraszke, 2006) car les gouttes ont un plus gros diamètre (orages estivaux, pluies de type méditerranéenne).

Le terme anglais « splash » est une onomatopée qui traduit l'éclaboussure d'une goutte de liquide tombant sur une surface solide ou liquide. Les gouttes de pluie qui tombent sur le sol produisent un effet de rejaillissement (« splash ») avec un arrachement de matière de sol.

Pour donner un ordre de grandeur du niveau d'agressivité de l'effet « splash », une pluie équivalente à une lame d'eau de 1 mm tombant à une distance de 10 cm du sol peut détacher jusqu'à 10 grammes de matière par m² de sol, c'est-à-dire environ 100 Kilogrammes de sol par hectare. L'effet « splash » est l'un des processus principaux de l'érosion hydrique des sols. Il est susceptible de provoquer, même en l'absence de ruissellement, une reptation des particules sédimentaires. L'effet « splash » est d'autant plus fort que la taille des gouttes de pluie est importante : il se manifeste surtout pendant les pluies orageuses estivales.

Etant donné la multiplicité des facteurs qui régissent le degré d'érosion d'un sol, il est très difficile d'en estimer la production sédimentaire immédiatement après le passage d'un feu. Quelques publications retranscrivent des valeurs d'érosion :

- Ballais, 1992 : montagne Sainte-Victoire (région PACA)
Le substratum est principalement calcaire et les sols sont composés d'argiles et de marnes. En mesurant l'érosion du sol à partir d'une instrumentation installée (clous de nivellement) immédiatement après l'incendie d'août 1989, on observe une érosion hydrique 650 fois plus importante sur les sols brûlés par rapport aux parcelles intactes. Le délai vers une stabilisation morphodynamique est évalué expérimentalement à 1 an compte tenu des pluies plutôt faibles. Dans le cas d'une pluviométrie normale ou excédentaire, l'étude indique, sur la base de références bibliographiques, que l'équilibre serait plutôt atteint environ 4 et 5 ans après l'incendie.
- Martin, 1993 : Massif des Maures – bassin versant du *Réal Collobrier*
Le substratum est essentiellement constitué de roches cristallophylliennes (gneiss, micaschistes, phyllades). L'instrumentation mise en place sur ce bassin versant était déjà préexistante (étude hydrologique CEMAGREF), ce qui en fait le site où la chronique des pluies les plus riche de la littérature. L'étude de l'érosion menée après l'incendie d'août 1990, portait sur le suivi quantitatif des remplissages sédimentaires des retenues collinaires DFCI ainsi que l'étude de parcelles d'érosion dédiées.
Le taux de dégradation spécifique est de plus de 1500 t/km² sur une année (saison 1990-1991). Les années suivantes, ce taux décroît très fortement.
L'incendie a provoqué une augmentation spectaculaire de l'érosion des sols :
 - la charge fine : le ratio avant/après est de l'ordre de 1 à 100 à 1 à 5 000.
 - la charge grossière : le ratio avant/après est de l'ordre de 1 à 600 à 1 à 3 500.Les pertes de sols sur les petits bassins versants incendiés sont supérieures à celles observées sur la parcelle d'érosion incendiée. Sur cette dernière (surface de 75 m² pentée à 11°) la perte de sol mesurée est de 883 t/km² sur sol caillouteux (gneiss et micaschistes) pendant la première année après le feu. En comparaison, sur terrain boisé non incendiée, on ne mesure quasiment pas de perte de sol.
Cette publication mentionne des valeurs d'érosion à la suite d'incendies dans des contextes différents :
 - exemple en ARIZONA en 1959 (végétation de type maquis), le taux de dégradation spécifique est augmenté d'un ratio de 1 à 400 (production de 19,5 t/km²/an avant incendie contre 8400 t/km²/an après incendie). Sur certains secteurs, le taux de dégradation spécifique a même atteint des valeurs de 25 000 t/km²/an ;
 - exemple des Alpes Australiennes, où le taux de dégradation spécifique a été augmenté d'un ratio de 1 à 100.
- Lavabre, 1997 : Massif des Maures – bassin versant du *Réal Collobrier*

Cette publication complète l'étude évoquée précédemment (Martin, 1993) avec une durée d'analyse plus longue permettant d'évaluer l'effet de la reprise de la végétation sur la diminution de l'érosion. Cette publication précise également les taux de dégradation spécifique par année :

- 1 an après l'incendie (1990) : 569 t/km²/an ;
 - 2 ans après l'incendie (1991) : 66 t/km²/an ;
 - 3 ans après l'incendie (1992) : 76 t/km²/an.
- Shakesby, 1996 : Nord du Portugal, forêt de pins et d'eucalyptus
Les pertes de sols pour des conditions plutôt humides (pluviométrie au-dessus de la normale) après un incendie sont :

Type de forêt	Nombre d'années après l'incendie		
	1 an	2 ans	3 ans
pins	6,73 t/ha	9,47 t/ha	-
eucalyptus	-	14,37 t/ha	2,88 t/ha

La littérature nous indique que la production alluvionnaire immédiatement après un incendie peut être augmentée en moyenne dans une gamme de ratios compris entre 1 à 100 et 1 à 400.

Cette production sédimentaire excessive se produit immédiatement après le feu. Les sols, après lessivage de la partie superficielle par les pluies, retrouvent un « équilibre » sédimentaire original après 5 ans après le feu (BALLAIS, 1992). Cet équilibre est d'autant plus rapidement retrouvé que la végétation rase colonise rapidement les sols incendiés. La production sédimentaire peut être divisé par 8 après 3 années (LAVABRE, 1997).

La *Figure 6* fait une synthèse de la temporalité des processus en jeu dans la modification de la production sédimentaire après un incendie de végétation, puis illustre les mécanismes de retour à l'équilibre d'avant feu.

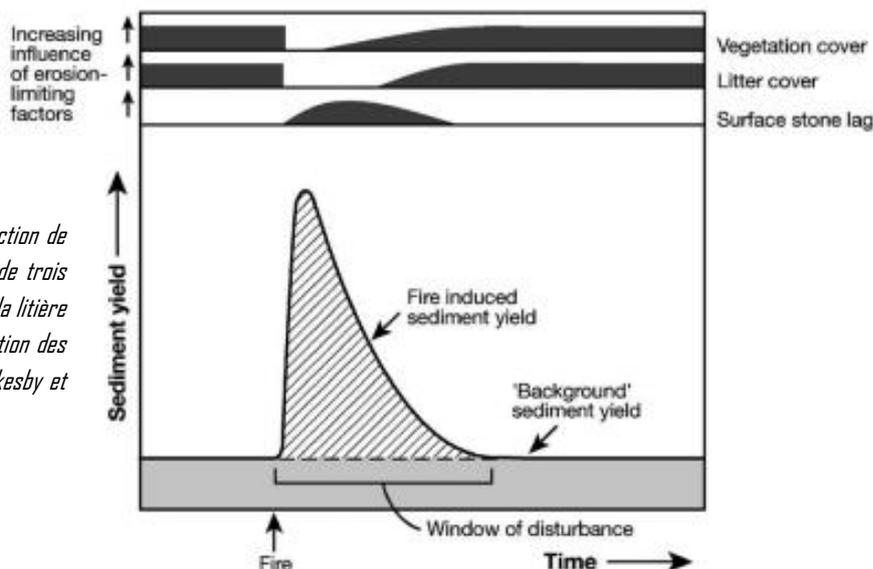


Figure 6 : Le déclin hypothétique de la production de sédiments après un feu de forêt et le rôle de trois facteurs (couverture végétale, couverture de la litière et développement des pierres) dans la réduction des taux d'érosion (basé sur Swanson, 1981 ; Shakesby et al., 1994 ; Prosser et Williams, 1998).

2 LA METHODOLOGIE UTILISEE

2.1 LES OBJECTIFS

De nombreuses publications traitent des **modifications du régime hydrologique après un incendie**. Plusieurs configurations (type de sols, pentes, végétations) ont été analysées et il en ressort que dans la majorité des cas, les débits après crues sont nettement augmentés. Cette augmentation se situe dans une large gamme comprise entre + 30 % et + 800 % (LAVABRE (1992, 1996, 1997) ; Shakesby 2006). Cette gamme est issue d'une compilation des analyses post-feu de différents pays (ETATS-UNIS, AUSTRALIE, ESPAGNE, PORTUGAL, FRANCE) et d'une multitude de configurations. Elle ne cible pas spécifiquement l'impact des incendies en contexte méditerranéen.

De manière analogue, plusieurs publications (Ballais, 1992 ; Martin, 1993 ; Lavabre, 1997 ; Shakesby, 1996) ont analysé la **production sédimentaire après un incendie**. Les valeurs sont très variables selon la configuration des sites (géologie, type de végétation, contexte pluviométrique). Certaines publications mentionnent une augmentation de l'érosion hydrique d'un rapport de 1 à 650 entre la situation avant feu et celle après feu, avec un retour à la normale compris entre 1 an (pluviométrie faible) à 5 ans (pluviométrie forte). D'autres publications, dans des contextes différents, évoquent une augmentation de l'érosion hydrique d'un rapport de 1 à 6000, avec des taux de production sédimentaire les plus forts dans l'année qui suit l'incendie et décroissants jusqu'à 3 à 5 ans après l'incendie.

L'objectif de cette étude de cas est de quantifier très précisément par des mesures, l'impact d'un incendie sur les modifications du régime hydro-sédimentaire, dans une configuration fréquemment rencontrée sur le département des PYRENEES-ORIENTALES : maquis arboré sur sols penté à dominante schisteuse.

2.2 L'APPROCHE EXPERIMENTALE

Les retours d'expériences et la littérature relative à la modification de l'hydrologie après un incendie indiquent que le ruissellement est systématiquement augmenté immédiatement après le feu. Le coefficient multiplicateur du ruissellement par rapport à une situation de référence est très fluctuant selon les sources, et parfois peu adapté au contexte de forêt méditerranéenne.

La référence scientifique la plus adaptée est celle relative aux expérimentations réalisées dans le cadre d'une étude sur un bassin versant incendié en 1990 (*bassin du real Collobrier, Lavabre, publications des années 1990*)

Localement, sur le département des PYRENEES-ORIENTALES, il n'y a jamais eu d'essai de quantification de l'érosion après un incendie. Le projet MONTCLIMA, de par la possibilité de mesurer précisément les phénomènes, permet d'apporter une connaissance circonstanciée et locale sur cette problématique d'érosion des sols. Cette connaissance est possible grâce au suivi hydro-sédimentaire sur des parcelles d'érosion installées pour ce projet.

2.2.1 PRINCIPE DE L'INSTRUMENTATION RETENUE

La détermination des variables à mesurer est un **préalable indispensable pour bien construire le dispositif** expérimental, aussi bien en ce qui concerne le dimensionnement des équipements (volumes des collecteurs, forme des canaux, organisation des différents modules de mesure et de représentation « démonstrative » de l'érosion), qu'en ce qui concerne le choix de la plage de mesure des différents capteurs et leur niveau de précision.

Dans ce cas précis des parcelles d'érosion de CERBERE, les variables à mesurer sont :

- la **lame d'eau précipitée** à faible pas de temps (hauteur et intensité de la pluie) ;
- le **débit ruisselé** à faible pas de temps (débit et volume des écoulements liquides) ;
- la **quantité des matériaux érodés** (masse des sables et graviers).

Afin d'avoir une connaissance précise des flux liquides (hydrologie) et solides (érosion hydrique), en fonction du type de terrain (parcouru par l'incendie, non incendié), l'instrumentation a été conçue selon 2 principes, comme illustré sur la *Figure 7* :

❖ **principe de la mesure en continu (flux) :**

- pluie à faible pas de temps
- débits ruisselés

❖ **principe de la mesure de bilans (cumuls) :**

- masse sédimentaire érodée

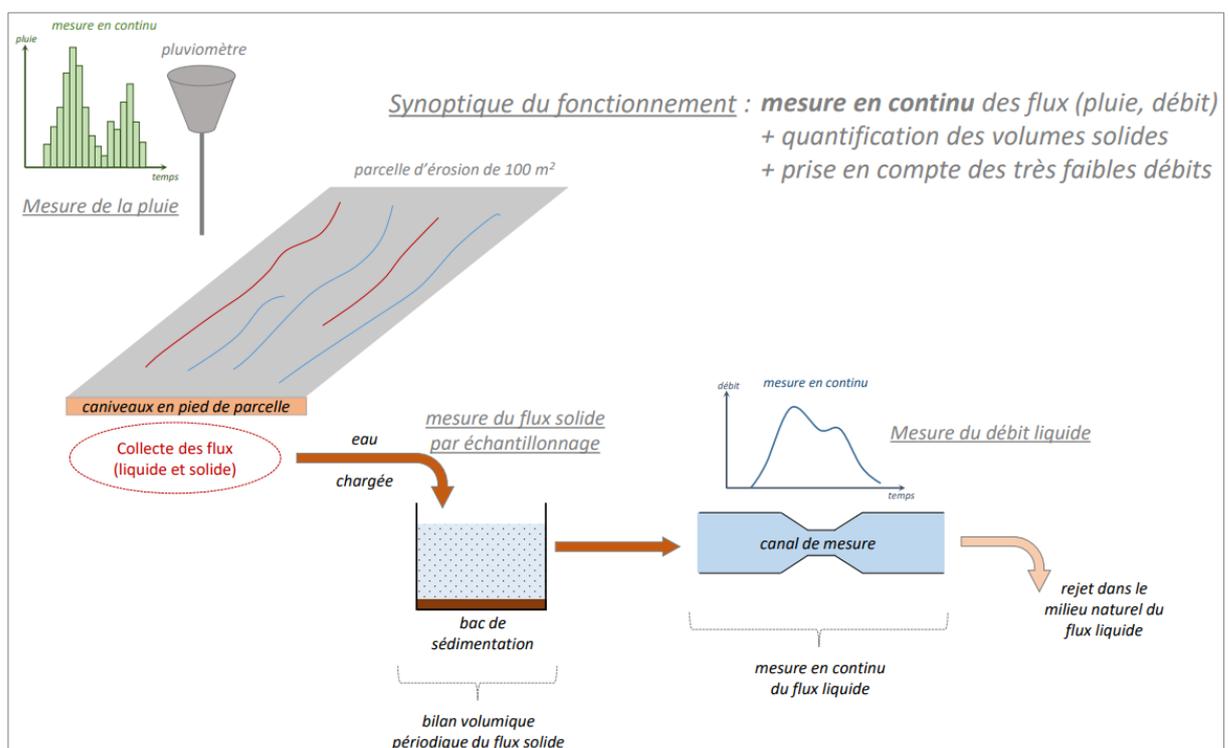


Figure 7 : schéma de principe du fonctionnement d'une parcelle d'érosion expérimentale

Pour mettre facilement en évidence l'impact d'un incendie sur l'augmentation du ruissellement et de l'érosion, 3 parcelles expérimentales ont été mises en place de manière à comparer les résultats des mesures entre elles :

- ❖ 1 parcelle de maquis arbustif, parcourue par le feu (**parcelle FEU 1**) ;
- ❖ 1 parcelle de maquis arbustif dense parcourue par le feu (**parcelle FEU 2**) ;
- ❖ 1 parcelle de maquis arbustif dense, non incendiée (**parcelle TEMOIN**).

2.2.2 CHOIX DU SITE

L'évaluation des effets des incendies sur les modifications hydro-sédimentaires des sols peut se faire de deux manières différentes :

- **possibilité 1** : FEU ARTIFICIEL

On choisit un site non incendié, puis on procède à un ou plusieurs brûlage(s) dirigé(s) pour « simuler » un incendie. Cela permet de choisir préalablement le site avec tous ses avantages : facilité des accès, maîtrise du foncier, choix des pentes, choix de la géologie, choix du contexte pluviométrique, délai suffisant pour commander les équipements, etc.).

Le dispositif est alors prêt à être déployé dès le passage du feu artificiel ce qui fait que l'on réussit à mesurer les variables immédiatement après le feu.

Toutefois, un brûlage dirigé est considéré comme **un feu de sévérité faible** et n'a pas les mêmes effets sur les sols qu'un feu réel. Avec une température plus faible, il n'impacte pas autant le sol et la végétation que ne pourrait le faire un feu réel.

- **possibilité 2** : FEU REEL

Le feu réel est souvent de sévérité moyenne à forte et a un impact important sur les sols. Il représente la réalité. La difficulté pour instrumenter des parcelles sur ce type de feu est que l'on doit adapter rapidement le dispositif à la localisation du feu et que souvent on ne peut pas équiper immédiatement après le feu : difficultés liées au foncier, aux accès, à la mise en œuvre, etc.

Il peut se passer un délai de 1 à 2 mois après le passage du feu avant que l'instrumentation soit opérationnelle. Ce délai est très dépendant de la localisation du site et de la maîtrise foncière.

Pour ce projet, afin d'évaluer au plus juste la réalité des phénomènes, nous **avons fait le choix d'instrumenter des parcelles après le passage d'un feu réel**.

Afin d'être le plus réactif possible, l'ensemble des équipements ont été conçus et dimensionnés pendant l'été/automne 2021, **en prévision** d'une installation sur un feu qui viendrait à se produire.

Cette **stratégie « opportuniste »** a nécessité de pré-identifier des sites intéressants à instrumenter.

Les sites pré-identifiés, en fonction de leurs caractéristiques géologiques, pluviométriques, de relief et leur prédisposition au feu, sont par ordre de préférence (Figure 8): Côte Vermeille / Albères / Fenouillèdes / Bas Vallespir / Aspres / L'AUDE – Corbières Alaric.

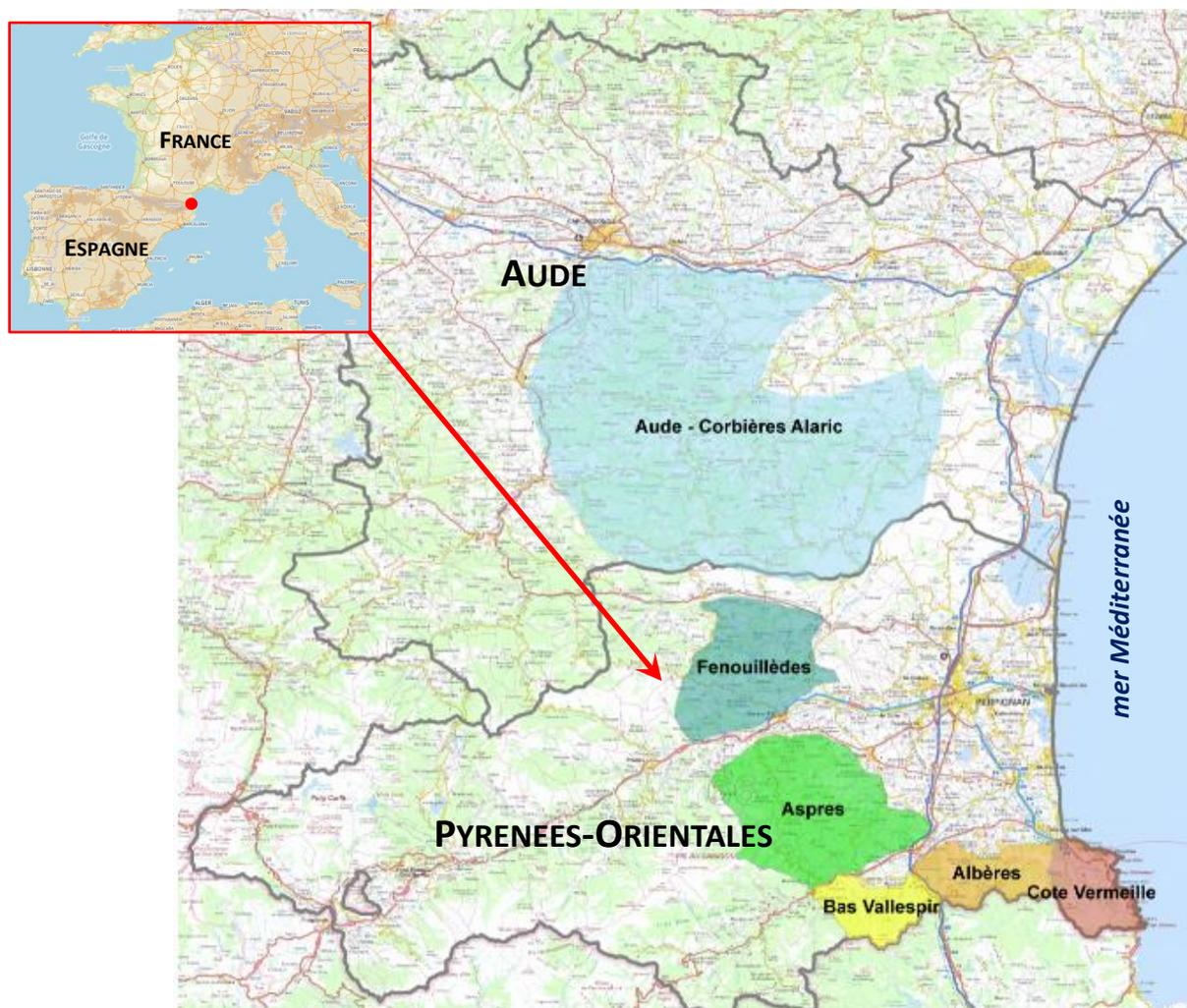


Figure 8 : localisation des sites possibles pouvant être instrumenter en cas de survenue d'un incendie

La côte Vermeille est un site d'expérimentation à privilégier car il est prédisposé à générer des risques hydrauliques induits post-incendie du fait de la vulnérabilité de ce territoire aux feux (végétation méditerranéenne, activités humaines, régime des vents, pentes marquées, sols schisteux) ainsi qu'à la présence d'enjeux denses et forts.

Au cours de l'été 2021, deux incendies se sont produits sur la côte Vermeille :

- **l'incendie du 16 juin 2021 sur la commune de PORT-VENDRES** en contrebas du Fort Béar. Ce feu a impacté environ 33 ha de garrigue sur d'anciennes terrasses agricoles. Les accès se font seulement par un sentier de randonnée et le foncier est essentiellement privé ;
- **l'incendie du 31 juillet 2021 sur la commune de CERBERE** en forêt domaniale (51 ha). Le foncier est totalement maîtrisé (Etat) et les accès sont très faciles (bord de piste).

La consultation des entreprises pour la mise en place de l'instrumentation a été faite sur la base du feu de PORT-VENDRES, avec une visite sur site qui a eu lieu le 31 août 2021. Toutefois, pour des facilités d'accès et de maîtrise du foncier, nous avons retenu d'instrumenter les terrains incendiés sur la commune de CERBERE.

Le 31 juillet 2021, en milieu d'après-midi, un incendie s'est déclaré sur la partie sud de la commune de CERBERE (Figure 9). Poussé par une forte tramontane, le feu qui est partie en bordure de la RD914 a parcouru 51 ha jusqu'à PORTBOU (10 ha incendiées côté français et 41 ha côté espagnol).



La végétation incendiée est composée principalement de lande et maquis (50 ha) et marginalement de forêt fermée de conifères (1 ha). Côté français, l'intégralité de la végétation brûlée se trouve dans la forêt domaniale de CERBERE relevant du régime forestier. L'indice de sévérité de l'incendie y est globalement Fort (Figure 10). Pendant la recherche des sites pour implanter les parcelles d'érosion, nous avons retenu un indice de sévérité fort (Figure 11).

Figure 10 : Indice de Sévérité du feu de Cerbère défini sur la base du taux de combustion des végétaux

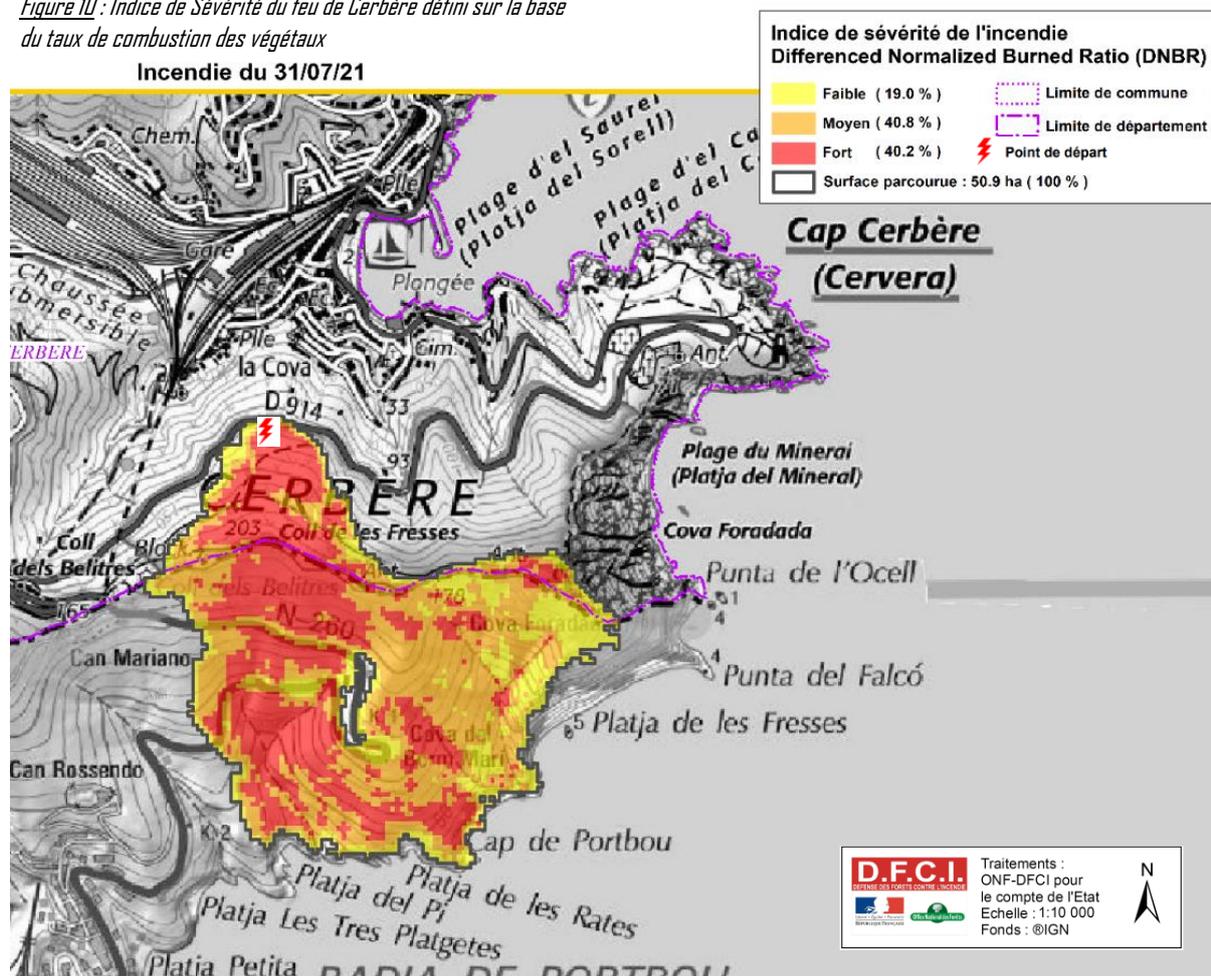


Figure 11 : état des sols avant l'implantation des parcelles expérimentales de mesure de l'érosion – les parcelles Feu1 et Feu2 sont choisies sur un indice de sévérité fort



Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été réalisé en octobre 2022 à partir d'un levé LIDAR⁵ par drone. Ce MNT permet de décrire précisément la topographie du versant incendié et les caractéristiques des parcelles expérimentales. La *Figure 12* présente l'ombrage de ce MNT et permet de visualiser le microrelief et le chevelu hydrographique. La *Figure 13* décrit les valeurs de pentes du versant.



Figure 12 : Modèle Numérique de Terrain (MNT) obtenu par la réalisation du Lidar en octobre 2022. L'emprise d'acquisition de ce lidar est délimitée en rouge. A l'extérieur de ce périmètre, le MNT représenté est celui du RGEAlt (2021 - pas de 1 m)

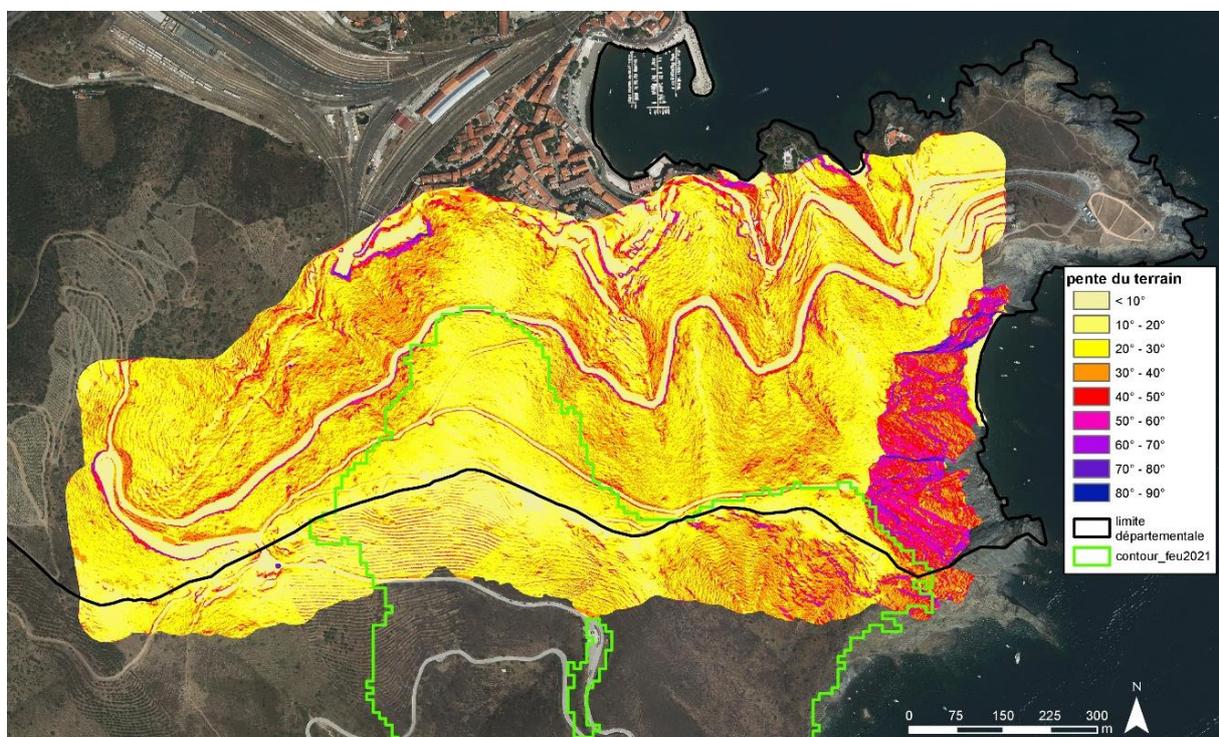


Figure 13 : carte de pente élaborée à partir du levé Lidar (octobre 2022) - le contour du feu du 31/07/2021 est figuré en trait vert

⁵ LIDAR : Light Detection And Ranging – en Français : détection et estimation de la distance par laser. Technique de mesure à distance permettant de réaliser des levés topographiques à grande échelle (semis de points) ayant la capacité à décrire le relief sous la végétation.

2.2.3 DIMENSIONNEMENT DU DISPOSITIF

2.2.3.1 QUANTIFICATION DE LA LAME D'EAU PRECIPITEE

La qualité de la mesure de l'érosion sur des petites surfaces dépend fortement de la capacité du dispositif à pouvoir mesurer précisément la pluviométrie à faible pas de temps, surtout pour bien décrire les épisodes pluvieux brefs et intenses.

La mesure de la pluviométrie au sol peut se faire à l'aide de plusieurs technologies d'instruments :

- Les pluviomètres à augets qui décrivent parfaitement le régime des pluies, mais très difficilement les cumuls de précipitations en présence de grêle et de neige ;
- Les pluviomètres à pesée qui donne l'équivalent en eau de l'ensemble des précipitations : liquide et solide. Ces instruments sont adaptés en sites montagnards isolés.
- Les pluviomètres à impact, qui « compte » le nombre d'impact de gouttes par seconde sur une surface rigide afin d'en déduire une lame d'eau équivalente. La précision de cet appareil est parfois discutable puisque qu'on peut avoir un écart dans la mesure de l'ordre de 20 % par rapport à la pluie réelle. Ce système mesure très mal les précipitations solides (grêle et neige).

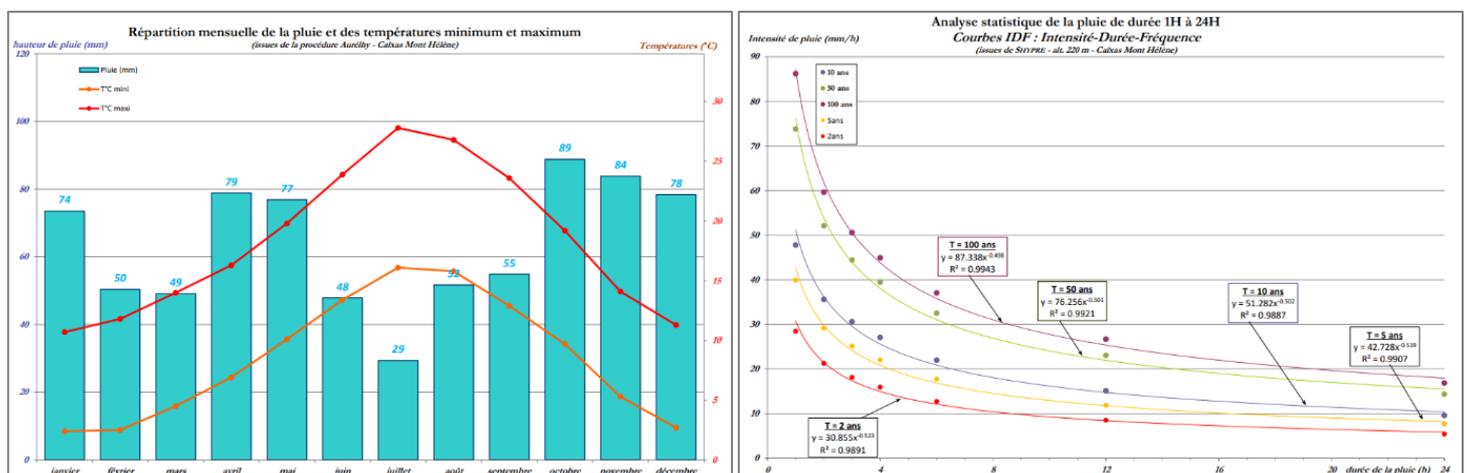
Compte tenu de la localisation du site de mesure, et de la nécessité d'avoir une bonne précision de mesure de pluie brèves, nous avons opté pour un pluviomètre à double augets mécaniques de la marque PrécisMéca, avec une ouverture de 400 cm² et une précision de 0,2 mm.

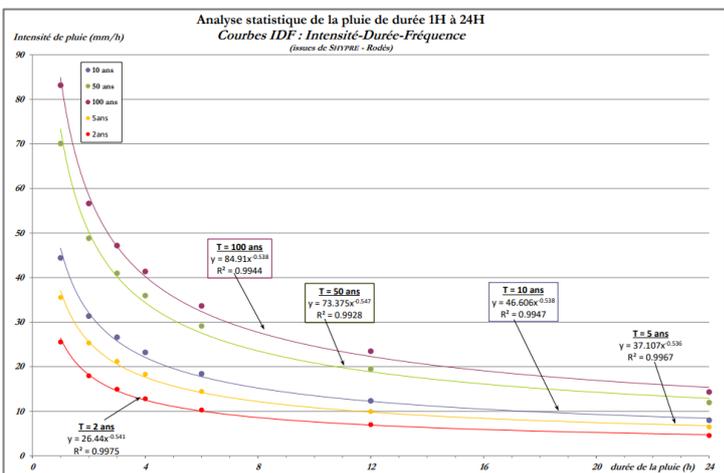
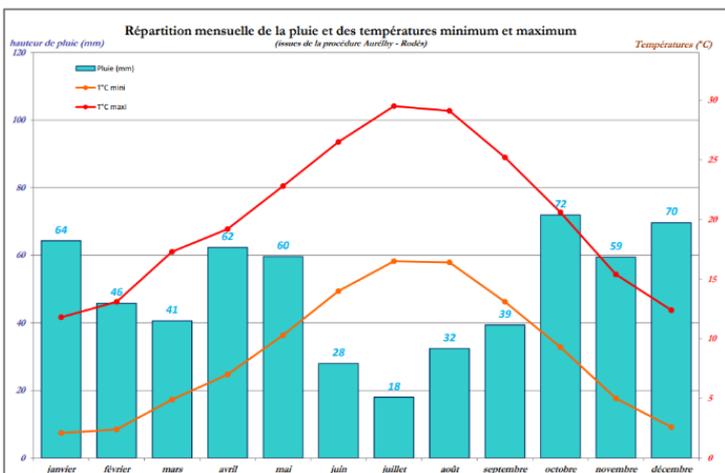
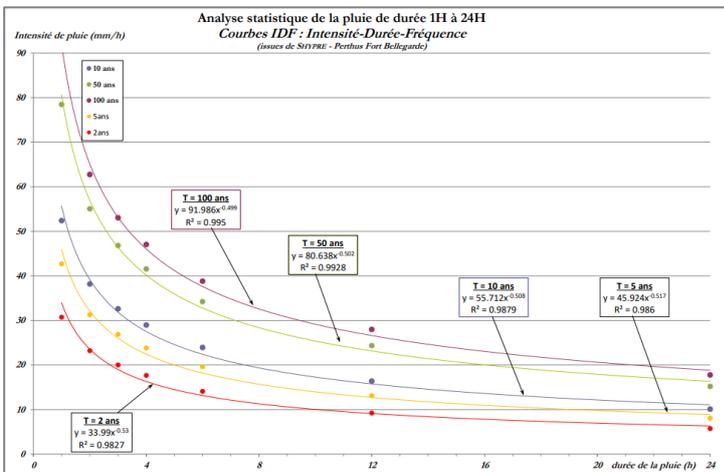
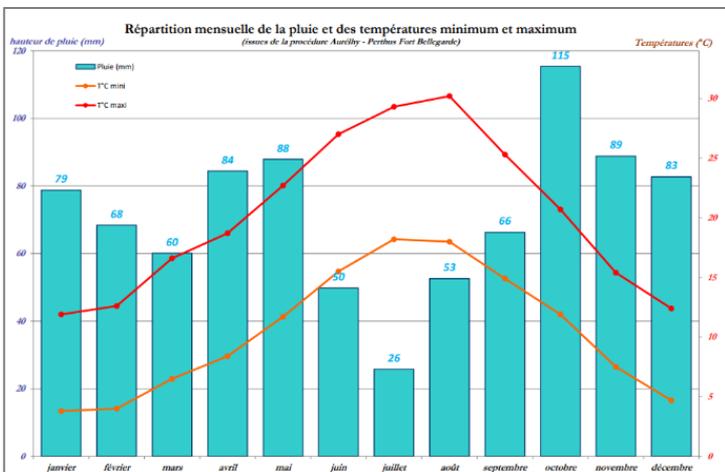
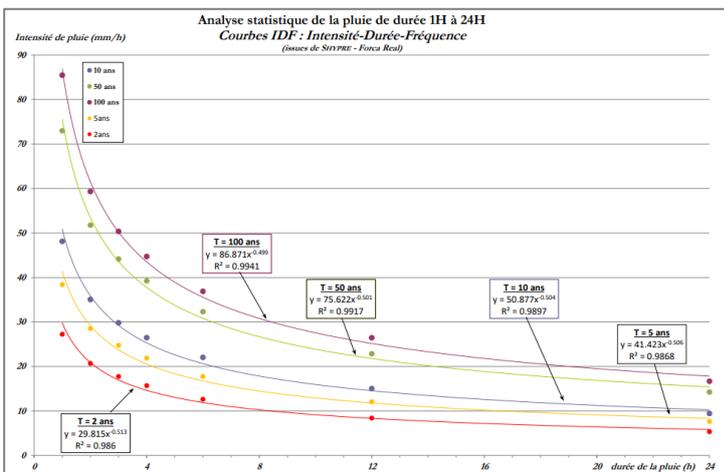
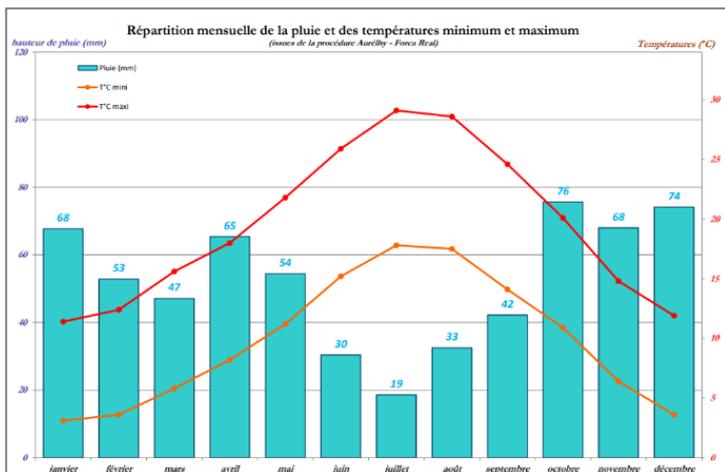
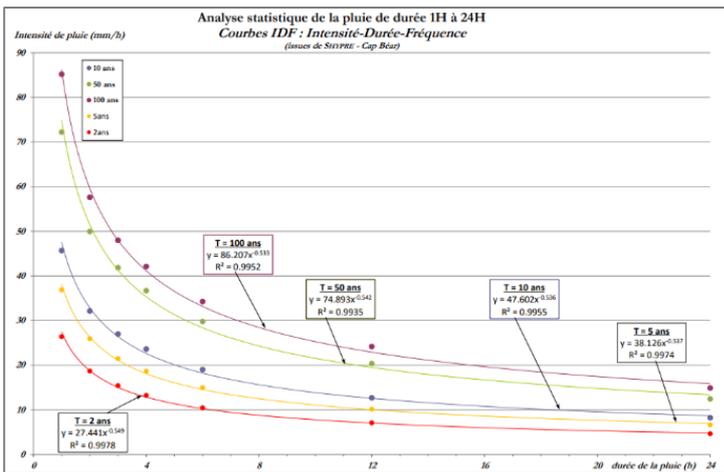
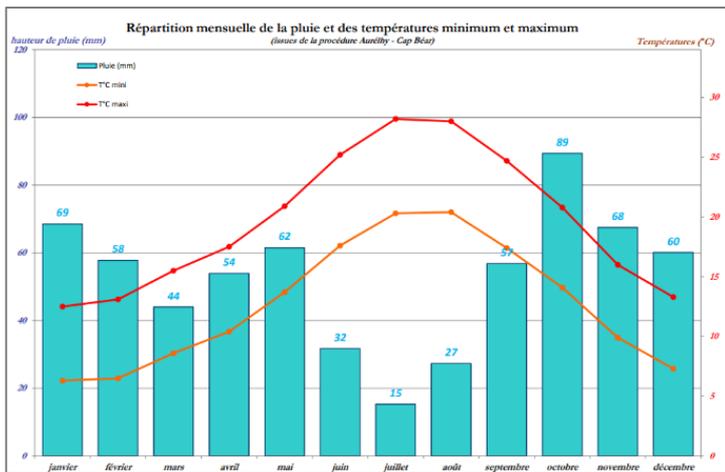
Pour plus de simplicité et une réduction de l'investissement, étant donné que le dispositif a besoin d'être visité périodiquement (au plus tous les 2 mois), nous avons fait le choix de ne pas télétransmettre les données. Les enregistrements sont alors déchargés manuellement à chaque visite d'entretien.

Dans une configuration idéale, il serait nécessaire de mettre en place ce type de pluviomètre au droit de chaque parcelle d'érosion. Par souci d'économie et dans un objectif de cohérence d'investissement, ainsi que de facilité d'entretien et de proximité des parcelles les unes avec les autres, il est proposé de ne mettre en place qu'un seul pluviomètre, au centre du dispositif.

La *Figure 14* illustre les régimes des pluies qui se produisent sur les sites pré-identifiés. Le pluviomètre PrécisMéca PLV400 est adapté à la mesure de ces pluies qui peuvent être intenses (> 100 mm/h).

Figure 14 : données climatologiques et caractéristiques du régime des pluies issus des procédures Auréthy et Shypre sur les différents sites envisagés : Aspres (Caixas), Côte Vermeille (Cap Béar), Fenouillèdes (Força Réal), Albères (Perthus), Conflent (Rodès).





2.2.3.2 QUANTIFICATION DE LA LAME D'EAU RUISSELEE

Pour chaque épisode de pluie, la quantification du volume liquide produit par la parcelle d'érosion issu du ravinement superficiel direct est une donnée essentielle puisqu'elle permet de mettre en évidence les volumes d'eau en jeu pour in fine permettre une compréhension de la capacité des sols à favoriser ou non l'écoulement des eaux, ainsi que la concentration des matériaux arrachés.

Ces quantifications reposent sur la méthode par intégration puisqu'il est envisagé de mettre en place des parcelles d'érosion d'environ 100 m² de surface. Concrètement, il s'agit de mesurer un débit d'écoulement liquide. En hydraulique de nombreuses méthodes permettent de mesurer un débit. Dans le cas présent, le moyen le plus pertinent est de procéder à la mesure à l'aide d'un canal calibré.

Ce canal peut-être, soit monté directement sur place, soit être déjà fabriqué en usine. Dans le premier cas, la courbe de tarage (relation hauteur d'eau – débit) qu'il est nécessaire de déterminer dépend très fortement de la bonne réalisation de l'ouvrage. Des campagnes de mesures sont alors nécessaires pendant une durée allant d'une à plusieurs saisons hydrologiques.

Dans le deuxième cas, les gabarits déjà pré-calibrés en usine permettent une quantification immédiate après la mise en œuvre sur le site.

Afin de gagner du temps pour la campagne de mesures **nous préconisons de s'orienter vers la solution du gabarit de canal pré-calibré en usine.**

Dans ce cas, plusieurs géométries sont envisageables. Elles dépendent :

- du débit maximum qu'il est nécessaire de mesurer ;
- des faibles débits représentatifs des averses de pluie courantes ;
- de la précision des mesures ;
- de la prise en compte du risque obstruction par des flottants ;
- de la prise en compte des dépôts (sables et graviers) qui peuvent se former ;
- de la facilité de mise en œuvre et d'entretien ;
- du coût d'achat, d'installation, de mise en route et d'entretien.

Les gabarits les plus courants qui peuvent répondre à ces exigences sont notamment :

- Le canal de type H-Flume⁶ avec sa variante HS-Flume ;
- Le canal jaugeur de type Kafaghi-Venturi ;
- Le canal jaugeur de type Parshall.

La *Figure 15* fait un bilan comparatif des principaux débitmètres qui peuvent être utilisés pour cette étude. D'autres canaux jaugeurs moins courants peuvent être également cités CUTTHROAT, LEOPOLD-LAGCO, etc. mais ne permettent généralement pas d'effectuer des mesures précises des petits débits et, ont de ce fait, été écartés de l'analyse comparative des options techniques.

⁶ L'appellation H provient du fait que cette géométrie correspond à la huitième conception du canal (8^{ème} lettre de l'alphabet) d'une série commençant par "A". Cette géométrie combine la sensibilité d'un déversoir à paroi mince avec les propriétés d'autonettoyage d'un canal.

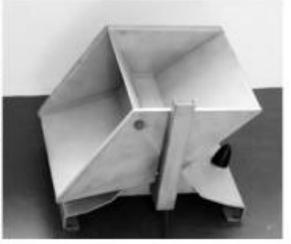
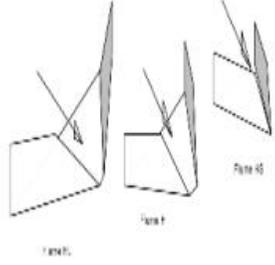
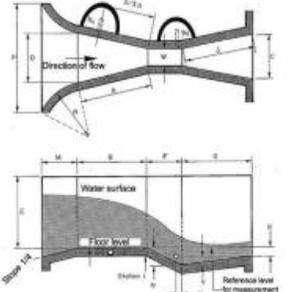
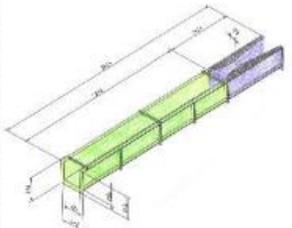
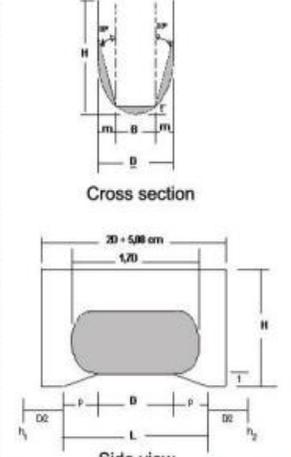
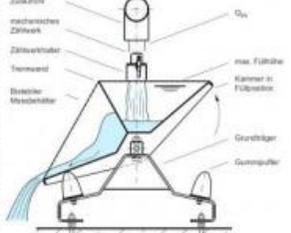
	H-Flume	Parshall	Khafagi-Venturi	Palmer BOWLUS	Fluid Tipper
ILLUSTRATIONS					
SCHEMAS	<p>Il existe trois types « flume » :</p>  <p>le H-Flume le HL-Flume pour les forts débits le HS-Flume pour les faibles débits</p> <p>Grâce à des géométries différentes, ils couvrent plusieurs gammes de débits.</p>	 <p>Le canal Parshall fonctionne sur le principe d'un rétrécissement (effet Venturi) combiné à une « marche » en fond.</p> <p>Comme tous les canaux, il permet aux écoulements de passer par le régime critique (de fluvial à torrentiel).</p>	 <p>Le canal Khafagi-Venturi possède un fond plat et les écoulements subissent un rétrécissement (effet Venturi) pour un passage en régime critique.</p>	 <p>Cross section</p> <p>Side view</p> <p>Fonctionnement également sur le principe du régime critique.</p>	 <p>La mesure est basée sur le principe des volumes élémentaires, à l'image du fonctionnement des pluviomètres à augets.</p>
AMPLITUDE DE MESURE DE DEBITS POSSIBLES (SELON MODELE)	<ul style="list-style-type: none"> Hs-122 mm : 0,0046 l/s à 2,41 l/s Hs-152 mm : 0,0056 l/s à 3,96 l/s Hs-183 mm : 0,0066 l/s à 6,513 l/s Hs-244 mm : 0,0086 à 13,31 l/s Hs-305 mm : 0,0105 l/s à 23,22 l/s 	<ul style="list-style-type: none"> col de 25 mm : 0,13 l/s à 4,38 l/s col de 51 mm : 0,4 l/s à 8,75 l/s col de 76 mm : 0,82 l/s à 52,56 l/s 	<ul style="list-style-type: none"> QV302 : 0,5 l/s à 6,93 l/s QV303 : de 0,5 l/s à 29 l/s 	<ul style="list-style-type: none"> diamètre 102 mm : 0,2 l/s à 2,2 l/s diamètre 152 mm : 0,98 l/s à 8,9 l/s diamètre 203 mm : 2,1 l/s à 18,96 l/s 	<ul style="list-style-type: none"> modèle 2 L → jusqu'à 0,25 l/s modèle 5 L → jusqu'à 0,63 l/s modèle 10 L → jusqu'à 1,3 l/s modèle 16 L → jusqu'à 2 l/s modèle 25 L → jusqu'à 3,1 l/s modèle 40 L → jusqu'à 5 l/s
Canal d'aménée – caractéristiques	Longueur d'au moins 5 fois la hauteur d'eau maximum. Pente du canal d'aménée < 1 %	Longueur d'au moins 20 fois la dimension du canal d'arrivée d'eau Pente du canal d'aménée < 1 %	Longueur d'au moins 10 fois la hauteur d'eau maximum. Pente du canal d'aménée < 0,2 %	Longueur d'au moins 25 fois la dimension de la conduite d'aménée Pente du canal d'aménée < 2 %	Aucun, principe de la chute
Marge d'erreur renseignée	Le Flume de type Hs permet de mesurer les plus petits débits avec une étendue assez intéressante vers les débits les plus forts et une faible marge d'erreur.	± 3 % à condition d'un strict respect des dimensions de construction et d'installation	± 1 % sur la gamme de débit comprise entre 5 et 100 % du maximum	± 3 % A condition d'un strict respect des dimensions de construction et d'installation	Non précisé par le fabricant
Facilité de construction sur place à partir de plans	Difficulté = moyenne	Difficulté = forte (nombreux plans à assembler)	Difficulté = forte (courbure à respecter)	Difficulté = Forte	Inenvisageable
Prix (hors frais de port et douane)	3 000 \$ pour un canal et le capteur de mesure de hauteur d'eau (y compris la batterie et le data logger) Aux USA	Environ 2000 € en europe	Environ 1 000 € en europe	inconnu	entre 1 600 € et 2 300 € H.T. selon modèle

Figure 15 : équipements envisageables pour la mesure de petits débits – caractéristiques de chaque débitmètre, ses avantages et ses limites d'utilisation

2.2.3.3 ESTIMATION DES DEBITS DE RUISSELLEMENT SUR UNE PARCELLE DE 100 M²

Pour choisir le type de débitmètre le plus adapté au site de mesure, il est nécessaire de déterminer avec exactitude les débits caractéristiques qui peuvent être produits par chaque parcelle.

Compte tenu de la faible superficie des parcelles considérées, il est tout à fait adapté d'utiliser la **méthode rationnelle** en utilisant les coefficients de MONTANA du secteur d'étude.

$$Q_T = \frac{C_R \cdot i(t_c, T) \cdot S}{3,6}$$

avec : Q_T : débit de pointe de la période de retour T (m³/s)

C_R : coefficient de ruissellement du bassin, fonction de T

$i_{mm/h}(t_c, T)$: intensité de la pluie de durée t_c et de période de retour T (mm/h)

S : superficie du bassin versant (km²)

t_c : temps de concentration⁷ du bassin (h)

Les coefficients de Montana liés au contexte pluviométrique de la zone d'étude⁸ sont liés par les relations :

$$P_{mm}(t_c, T) = a_T \cdot t_c^{1-b} \quad \text{et} \quad i_{mm/h}(t_c, T) = a_T \cdot t_c^{-b}$$

avec : $P_{mm}(t_c, T)$: hauteur de pluie de durée t_c et de période de retour T (mm)

a_T et b : coefficients de Montana de la période de retour T représentatifs du régime des pluies à faible pas de temps sur le site retenu.

Comme explicité dans le paragraphe §2.2.2. « Choix du site », nous avons procédé au dimensionnement du dispositif avant d'avoir fait le choix définitif du site à instrumenter. Pour cela, nous avons procédé au dimensionnement sur les différents sites envisagés (*Figure 8*). Les coefficients de Montana utilisés sont alors compilés sur la *Tableau 1*.

		Caractérisation de la pluie de projet - coefficients de Montana					
		a _{2ans}	a _{5ans}	a _{10ans}	a _{50ans}	a _{100ans}	b
Sites potentiels	Caixas Mont Hélène	30.8	42.7	51.3	76.3	87.3	0.51
	Cap Béar	27.4	38.1	47.6	74.9	86.2	0.54
	ForcaRéal	29.8	41.4	50.8	75.6	86.9	0.50
	Perthus	34.0	45.9	55.7	80.6	92.0	0.51
	Rodès	26.4	37.1	46.6	73.4	84.9	0.54

Tableau 1 : coefficients de Montana du régime des pluies sur les différents sites envisagés

⁷ Temps que met la goutte d'eau tombée à l'extrémité du bassin pour atteindre l'exutoire en suivant le plus long chemin hydraulique.

⁸ La pluie de projet retenue est fonction du temps de concentration t_c du bassin.

➤ DETERMINATION DU TEMPS DE CONCENTRATION t_c

Avec une surface de parcelle d'environ 100 m² (parcelle rectangulaire, de 20 m dans le sens de la pente et 5 m en largeur), le plus long chemin hydraulique parcouru par les écoulements sera de l'ordre de 20 mètres. Cette distance correspond à un temps de concentration très court, bien en deçà de ce qui est habituellement observé sur les bassins versants et pour lesquels plusieurs méthodes hydrologiques de détermination du temps de concentration peuvent être utilisées. Dans le cas de parcelles de si faibles dimensions, ces méthodes se trouvent en dehors de leur champ d'application respectif. En effet, très peu de formules ont été construites à partir des temps de concentration très courts. Par exemple, la formule de KIRPICH, réputée pour estimer fidèlement les temps de concentration des très petits bassins, a été déterminée à partir d'un échantillon de bassins dont la surface est comprise entre 0,4 ha et 43 ha.

A titre de comparaison, les parcelles d'érosion à étudier possèdent une surface de l'ordre de 0,01 ha, soit 40 fois moins que le plus petit échantillon de définition de la formule de KIRPICH.

La seule méthode applicable, et qui donne généralement des résultats très satisfaisants, est celle dite « des vitesses ». Il s'agit d'une formule à base physique détaillée dans l'ouvrage Hydrologie (Musy et Higy, 2004).

Le temps de concentration $t_c = t_h + t_r + t_e$ est alors la somme des 3 termes suivants :

- **le temps d'humectation t_h** → temps nécessaire pour saturer le sol avant l'apparition du ruissellement
- **le temps de ruissellement sur plan incliné t_r** → temps de parcours en écoulement diffus
- **le temps d'écoulement t_e** → temps de parcours en écoulement concentré

Le principal objectif des parcelles d'érosion est de mesurer **l'ablation de la strate superficielle de sol** sous l'effet du forçage des précipitations et selon un état de dégradation défini (incendié ou non).

Les processus liés aux ravinements et aux écoulements concentrés ne traduisent pas la variable d'ablation que nous souhaitons quantifier. Il est donc important d'éviter la survenue de ces processus afin de ne pas fausser la mesure. Pour cela, la faible surface des parcelles permettra de s'en affranchir. Par conséquent, le temps d'écoulement t_e est arbitrairement considéré comme nul.

Le temps d'humectation est en général compris entre 5 minutes et 10 minutes. Ce temps d'humectation peut être considérablement réduit dans les cas suivants :

- une pluie sur un sol très sec sera difficilement absorbée dans les premiers instants (principe du filet d'eau qui ruisselle facilement au début sur une éponge très sèche). Dans le cas d'une surface très petite, les écoulements peuvent parcourir un linéaire significatif avant que les terrains ne deviennent prédisposés à l'infiltration ;
- une pluie sur un sol déjà saturé en eau. Dans ce cas, le temps d'humectation est très court avant que l'eau précipitée commence à ruisseler.

Le **temps d'humectation** peut alors être compris entre **1 minute et 5 minutes**.

En ce qui concerne le temps de ruissellement, celui-ci correspond à :

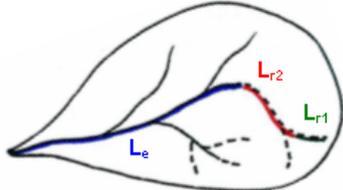
- un écoulement sur un plan incliné avec des **écoulements non concentrés**. Dans le cas présent, on fait l'hypothèse que ce type d'écoulement intervient sur les 10 premiers mètres. Comme l'indique la *Figure 16*, le temps correspondant serait de l'ordre de

1,2 minutes, ce qui correspond à une vitesse moyenne de ruissellement de près de 15 cm/s.

- un écoulement sur un plan incliné avec un **début de concentration des écoulements**. Ce phénomène de concentration des écoulements doit être quantifié car il est responsable en grande partie de l'entraînement des matériaux vers le réseau hydrographique. Dans le cas présent, compte tenu de la pente des terrains et du type de sol, nous retenons une vitesse moyenne de l'ordre de 1,5 m/s. Ce temps correspond au parcours des 10 mètres en partie basse. Il est très faible, de l'ordre quelques secondes (10 s).

Le **temps de ruissellement** direct sur la parcelle serait donc de l'ordre de **1 minute**.

Figure 16 : calcul du temps de ruissellement selon la méthode à base physique issue de MUSY et HIGY, 2004.

METHODE A BASE PHYSIQUE																									
$T_c = T_h + T_r + T_e$	avec T_h : Temps d'humectation T_r : Temps de ruissellement sur plan incliné T_e : Temps d'écoulement																								
Temps d'humectation : temps nécessaire à la production de ruissellement																									
$t_h = 5 \text{ min}$																									
Temps de ruissellement : temps nécessaire aux écoulement pour rejoindre le réseau hydrographique																									
<p>1- Temps de ruissellement non concentré : t_{r1}</p> <table border="1"> <tr> <td>$a_{100} =$</td> <td>120.00</td> <td>paramètre de Montana</td> </tr> <tr> <td>$b =$</td> <td>0.32</td> <td>paramètre de Montana</td> </tr> <tr> <td>$e_{100} =$</td> <td>0.80</td> <td>coefficient d'écoulement</td> </tr> <tr> <td>$n =$</td> <td>0.15</td> <td>coefficient de rugosité de Manning</td> </tr> <tr> <td>$L_{r1} =$</td> <td>10 m</td> <td>longueur du cours d'eau</td> </tr> <tr> <td>$l_{r1} =$</td> <td>0.30 m/m</td> <td>pente du tronçon du cours d'eau</td> </tr> </table> <p>$t_{r1} = 1.2 \text{ min}$</p>	$a_{100} =$	120.00	paramètre de Montana	$b =$	0.32	paramètre de Montana	$e_{100} =$	0.80	coefficient d'écoulement	$n =$	0.15	coefficient de rugosité de Manning	$L_{r1} =$	10 m	longueur du cours d'eau	$l_{r1} =$	0.30 m/m	pente du tronçon du cours d'eau	<p>2- Temps de ruissellement concentré : t_{r2}</p> <table border="1"> <tr> <td>$L_{r2} =$</td> <td>10.0 m</td> <td>longueur du cours d'eau</td> </tr> <tr> <td>$V_{r2} =$</td> <td>1.50 m/s</td> <td>vitesse de ruissellement</td> </tr> </table> <p>$t_{r2} = 0.1 \text{ min}$</p> 	$L_{r2} =$	10.0 m	longueur du cours d'eau	$V_{r2} =$	1.50 m/s	vitesse de ruissellement
$a_{100} =$	120.00	paramètre de Montana																							
$b =$	0.32	paramètre de Montana																							
$e_{100} =$	0.80	coefficient d'écoulement																							
$n =$	0.15	coefficient de rugosité de Manning																							
$L_{r1} =$	10 m	longueur du cours d'eau																							
$l_{r1} =$	0.30 m/m	pente du tronçon du cours d'eau																							
$L_{r2} =$	10.0 m	longueur du cours d'eau																							
$V_{r2} =$	1.50 m/s	vitesse de ruissellement																							
$t_{r1} + t_{r2} = t_r \text{ calculé} = 1.3 \text{ min}$ $t_r \text{ retenu} = 1 \text{ min}$																									
Temps d'écoulement : temps nécessaire aux écoulements pour rejoindre l'exutoire du bassin																									

Au bilan, le **temps de concentration** d'une parcelle d'érosion de 100 m², selon les conditions initiales d'humidité du sol, serait compris entre **2 minutes et 6 minutes**.

➤ DEBITS CARACTERISTIQUES

En préalable au choix de l'instrumentation à mettre en place (géométrie du débitmètre et performances des capteurs), il est indispensable de préciser la gamme des valeurs attendues des débits ruisselés issue de la parcelle d'érosion.

Les flux à mesurer vont être générés, aussi bien par les épisodes pluvieux courants que ceux qualifiés d'exceptionnels. Afin de proposer la gamme de mesure la plus large possible, nous retenons la **pluie centennale** comme valeur **dimensionnante** pour la géométrie du débitmètre.

Les pluviomètres climatologiques fournissent rarement les caractéristiques des pluies pour un pas de temps inférieur à 6 minutes. Dans le cas présent, et malgré un temps de concentration nettement inférieur au pas de temps minimal de détermination des coefficients de Montana, nous faisons l'hypothèse que ces derniers **restent applicables** pour l'évaluation de l'**ordre de grandeur** de l'intensité pluvieuse.

Le *Tableau 2* fait la synthèse des intensités de pluie que l'on peut observer pour des pas de temps faibles (< 6 minutes) sur les différents sites pré-identifiés, et selon plusieurs périodes de retour.

Tandis que pour la période de retour 2 ans, on obtient une intensité horaire moyenne autour de 100 mm/h, pour la période de retour 100 ans, on obtient une valeur proche de 300 mm/h.

Tableau 2: intensités des pluies de références selon les sites pré-identifiés

		Intensité de la pluie de projet				
intensité pluie (mm/h)		2ans	5ans	10ans	50ans	100ans
Sites potentiels	Caixas Mont Hélène	100	138	166	247	282
	Cap Béar	95	132	165	260	299
	ForcaRéal	94	131	161	239	275
	Perthus	110	149	180	261	298
	Rodès	92	129	162	255	294

Ces intensités pluvieuses se traduisent sur une parcelle drainée de 100 m² par des débits allant de 0,51 l/s à 6,64 l/s (*Tableau 3*).

Tableau 3: gammes de débits de ruissellement selon les sites pré-identifiés

		Calcul du débit projet selon la méthode rationnelle				
Débit max (l/s)		2ans	5ans	10ans	50ans	100ans
<i>Coef. ruissellement</i>		0.2	0.3	0.5	0.6	0.8
Sites potentiels	Caixas Mont Hélène	0.55	1.15	2.31	4.12	6.28
	Cap Béar	0.53	1.10	2.29	4.33	6.64
	ForcaRéal	0.52	1.09	2.23	3.98	6.11
	Perthus	0.61	1.24	2.50	4.35	6.62
	Rodès	0.51	1.07	2.24	4.24	6.54
<i>moyenne</i>		0.54	1.13	2.32	4.20	6.44
<i>mini</i>		0.51	1.07	2.23	3.98	6.11
<i>maxi</i>		0.61	1.24	2.50	4.35	6.64

Lors de la mise en œuvre du dispositif, la délimitation des parcelles d'érosion devra s'adapter au terrain (microrelief, arbres, rochers, etc.) et certaines parcelles pourront avoir une surface légèrement supérieure à 100 m². Les débits attendus pourraient alors être supérieurs à ceux déterminés précédemment. Dans tous les cas, les débits seront inférieurs à la valeur de 10 l/s.

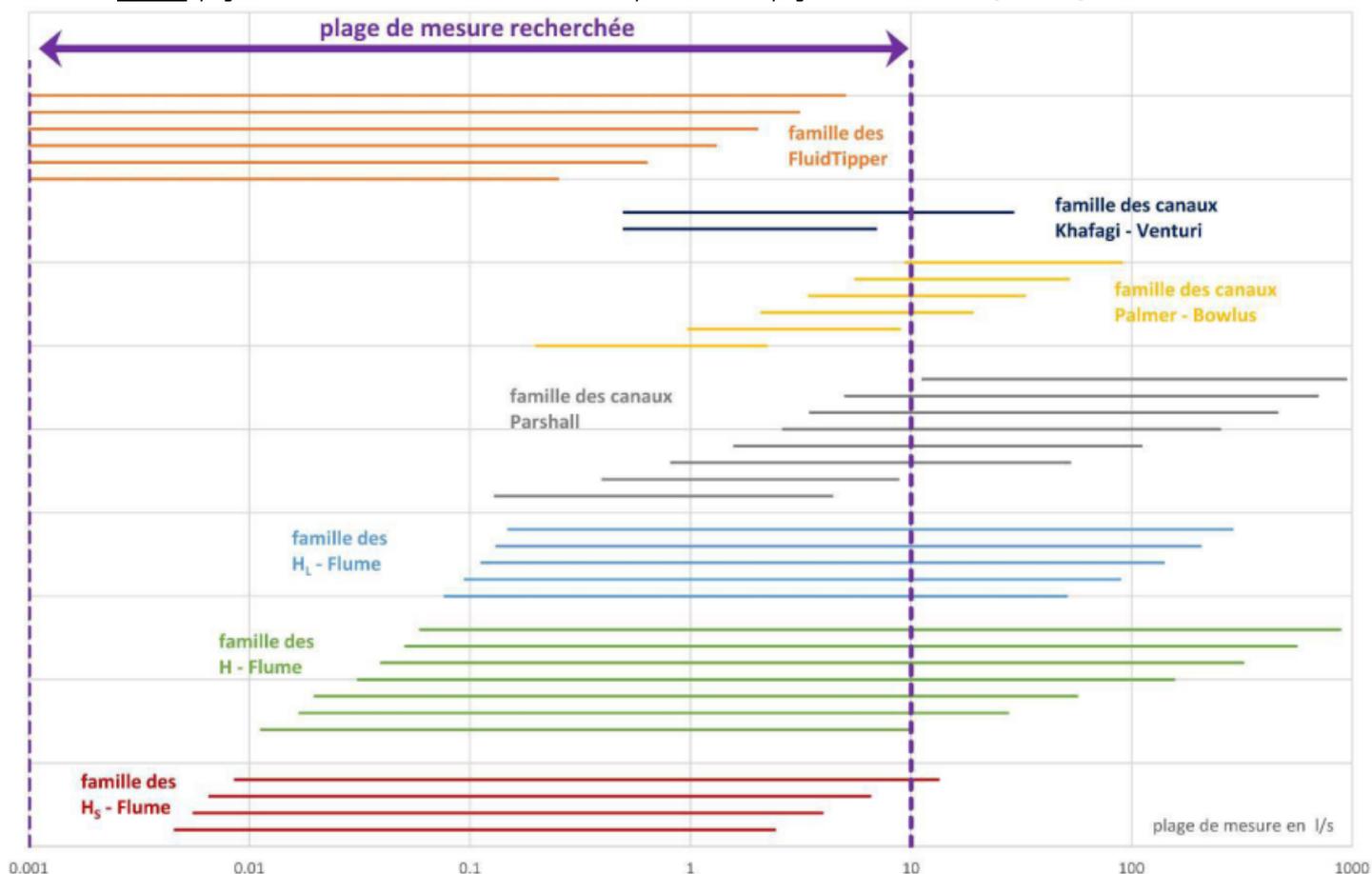
La valeur de débit de 10 l/s est celle retenue pour le dimensionnement de la **capacité maximum** de mesure du débitmètre.

Afin de mesurer l'intégralité des ruissellements, il est indispensable de pouvoir quantifier les très faibles débits générés par les averses pluvieuses courantes.

Dans l'idéal, la gamme de mesure à prendre en compte correspondrait à **l'intervalle [0 l/s - 10 l/s]**. Néanmoins, les instruments de mesure (débitmètre et capteurs) présentent des valeurs seuils qui ne permettent pas de mesurer des débits proches de la valeur zéro.

Maintenant que la gamme de mesure projet est définie, et en considérant les différents types de débitmètres envisageables (Figure 15), la comparaison entre la gamme de mesure projet et les gammes de mesures offertes par les différents équipements permet de préciser le matériel le mieux adapté (Figure 17).

Figure 17 : plages de mesures des différents débitmètres en comparaison avec la plage de mesure souhaitée [0 - 10 l/s]



On constate que les matériels de type FluidTipper (mesure de volume par le principe des doubles augets) permettent de mesurer les très faibles débits. En revanche, ils ne permettent pas de mesurer des débits supérieurs à 5 l/s, ce qui ne satisfait pas à nos besoins.

Les matériels de type H₃-Flume couvrent quant à eux largement la plage de mesure projet, sauf pour les très faibles débits (< 0,01 l/s). Ce type de débitmètre offre le **meilleur compromis de mesure**.

Au regard des plages de mesure respectives de chacun des appareils illustrés sur le graphique cidessus en comparaison à la plage recherchée de [0 - 10 l/s], il apparaît que le modèle H₃ Flume de 244 mm (0,8 Foot – mesure anglo-saxonne) est le plus adapté.

En effet, la valeur maximum de mesure de ce modèle à 13,31 l/s peut nous assurer d'une bonne prise en compte des pluies exceptionnelles. Mais ce qui est intéressant, c'est surtout la capacité de l'appareil à mesurer les très faibles débits (à partir de 0,0086 l/s⁹).

Pour pouvoir mesurer ces faibles débits, les sondes de mesures de hauteur d'eau devront être très précises et être placées en dessous du radier du HsFlume, idéalement dans un puit de tranquillisation.

2.2.4 CHOIX DES EQUIPEMENTS ET INSTRUMENTS

Les choix techniques et les spécifications des équipements et des instruments sont présentés ci-après.

2.2.4.1 DELIMITATION DES PARCELLES

➤ PRINCIPE

Afin de pouvoir faire des bilans hydro-sédimentaires précis, il est indispensable de connaître avec exactitude la surface drainée par les pluies. La surface ainsi délimitée lors de la construction de la parcelle doit être constante tout au long de la durée de vie du dispositif.

La délimitation se fait par la pose de bordures. Habituellement, les bordures sont fichées dans le sol, où parfois l'utilisation d'une disqueuse est nécessaire pour avoir une tranchée fine et nette permettant d'insérer les bordures en plaques de métal ou de bois.

Pendant la pose des bordures, une précaution importante doit être respectée : les travaux d'installation des bordures ne doivent pas mobiliser de sédiments, sinon les mesures de l'érosion seraient considérablement faussées par l'impact des travaux.

Dans le cas du site de CERBERE, le sol est composé de schistes très altérés, avec une proportion importante de pierres. Il n'est pas envisageable de ficher des bordures sans libérer un volume important de matériaux. Pour éviter cela, nous avons choisi, non pas de ficher les bordures, mais plutôt de les poser et de les compacter de manière à bien épouser les aspérités du sol.

➤ CHOIX DU MATERIEL

De manière à bien épouser les formes du sol, nous avons installé des boudins en matière synthétique résistante aux UV remplis de sable (*Figure 18*). Ce matériel est utilisé initialement comme sac de lestage des bâches de couverture agricole.

Ces sacs sont fixés entre eux et maintenus au sol par des fers à béton fichés à la masse.



Figure 18 : bordures de délimitation de la parcelle Témoin - 17/11/2021

⁹ Afin de se rendre compte de cette faible valeur de débit, cela est équivalent à vider de manière constante une bouteille de 1 litre pendant presque 2 minutes

2.2.4.2 MESURE DE LA PLUIE

➤ PRINCIPE DE LA MESURE

Le contexte pluviométrique de CERBERE se manifeste par des épisodes pluvieux souvent intenses (> 100 mm/h). Le pluviomètre du dispositif doit permettre de mesurer avec précisions ces épisodes intenses. Le site est également fortement impacté par des vents tempétueux auxquels l'instrument devra résister.

Les épisodes moins intenses (< 100 mm/h) devront également être fidèlement mesurés.

➤ CHOIX DU MATERIEL DE MESURE DE LA PLUIE

Le matériel retenu est le suivant (*Figure 19*):

- Marque : PARATRONIC
- Type : automatique à double augets
- Modèle : PLV400 ; ouverture 400 cm² ; 0.2 mm /impulsion ; sans chauffage
- Alimentation autonome (pile)
- Acquisition des données : enregistreur 3 voies sans télétransmission
- Installé sur support de type étau de maçon haubané en câblette diamètre 3 mm
- Pas de temps mesure choisi : 6 min en cohérence avec celui pris habituellement par les pluviomètres METEOFRANCE
- Capacité mémoire d'acquisition pour pas de temps de 6 min : 67 jours

Figure 19 : pluviomètre PLV400 installé sur le dispositif expérimental de CERBERE photo prise le 30 mars 2022

Vue sans capot à droite



2.2.4.3 MESURE DU DEBIT RUISSELE

➤ PRINCIPE DE LA MESURE

Un débit est par définition le ratio d'un volume d'eau par unité de temps. Cette grandeur ne peut pas être mesurée directement. Pour procéder à la mesure, nous utilisons un débitmètre, c'est-à-dire un gabarit à géométrie bien définie qui permet d'établir une **relation univoque entre le débit et la hauteur d'eau** (courbe de tarage). La simple mesure de la hauteur d'eau est donc suffisante pour déterminer la valeur du débit associé.

➤ CHOIX DEBITMETRE (OU CANAL DE MESURE OU CANAL JAUGEUR)

Afin de rendre opérationnel les débitmètres construits sur mesure et spécifiquement à la topographie d'un site, il est indispensable d'établir la courbe de tarage. Cela nécessite de recourir à une campagne d'étalonnage qui peut se révéler longue (plusieurs saisons hydrologiques), difficile (difficultés et temps d'accès) et contraignante (nécessité de se rendre sur place pendant les épisodes de crue).

Pour s'affranchir de ces contraintes, nous avons fait le choix de mettre en place **un gabarit à géométrie pré-calibrée de type canal jaugeur (Hs-Flume)**.

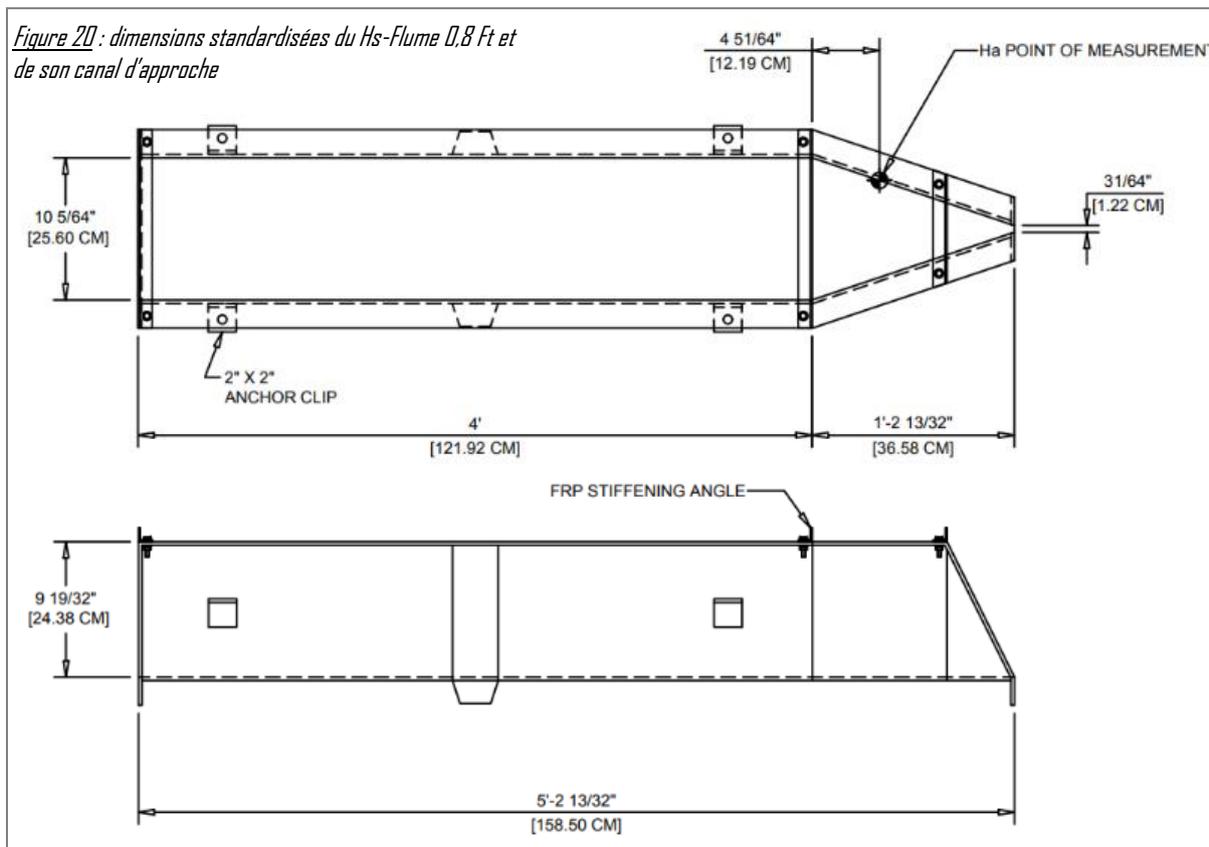
Les Hs-Flumes présentent les avantages suivants :

- Pré-calibrage en usine pour une utilisation immédiate sous réserves de respecter les consignes d'installation (horizontalité, alignement avec les écoulements, etc.) ;
- Pas de dérive de la mesure tant que la géométrie reste inchangée ;
- Installation plutôt facile et rapide ;
- Limitation des dépôts des sédiments jusqu'à une certaine valeur. Le fond plat facilite le nettoyage ;
- Modulable et peu impactant pour le milieu car nécessite assez peu de terrassement ;

Les inconvénients de ce type de canal jaugeur sont les suivants :

- La forme spécifique du gabarit ne permet pas l'installation en saillie d'une sonde de mesure du niveau d'eau au risque de modifier la courbe de tarage pré-établie ; dans ce cas il est préférable d'utiliser une mesure non intrusive par ultrasons ou radar (consommation plus importante) ;
- Pour l'utilisation d'une sonde pression (mesure intrusive dans l'écoulement), il est nécessaire de créer un puits de mesure à un endroit bien déterminé du convergent pour que la sonde ne modifie pas la géométrie du gabarit ;
- Il est nécessaire d'adjoindre un canal d'approche pour bien chenaliser les écoulements afin d'obtenir une surface d'eau peu perturbée et facilement mesurable ;
- L'horizontalité de l'équipement doit être garantie pour assurer la bonne application de la courbe de tarage.

Le modèle de Hs-Flume retenu est la version « small » (d'où l'appellation Hs, « s » pour small) de dimension caractéristique de 0,8 Foot (soit 24,38 cm). La *Figure 20* donne les caractéristiques géométriques de ce canal jaugeur.



Ce canal jaugeur possède une géométrie assez simple puisqu'il est composé d'un assemblage de parois planes. Il est assez simple à construire à partir des schémas des *Figure 20* et *Figure 21*.

Néanmoins, afin de rester fidèle à la courbe de tarage pré-calibrée en usine, une attention rigoureuse doit être portée sur le respect des côtes et des angles.

Dans le cadre du projet MONTCLIMA, les recherches de matériel d'hydrométrie de type H-Flume nous ont conduit vers un seul fournisseur¹⁰ de ce type d'équipement.

Compte tenu non seulement des délais, du prix et des difficultés interne à l'ONF pour l'importation de matériels en provenance des ETATS-UNIS, nous avons fait le choix de fabriquer ce débitmètre en régie (*Figure 22*).

Afin de simplifier la réalisation, nous avons choisi comme matériau de fabrication du contre-plaqué marine de 15 mm d'épaisseur.

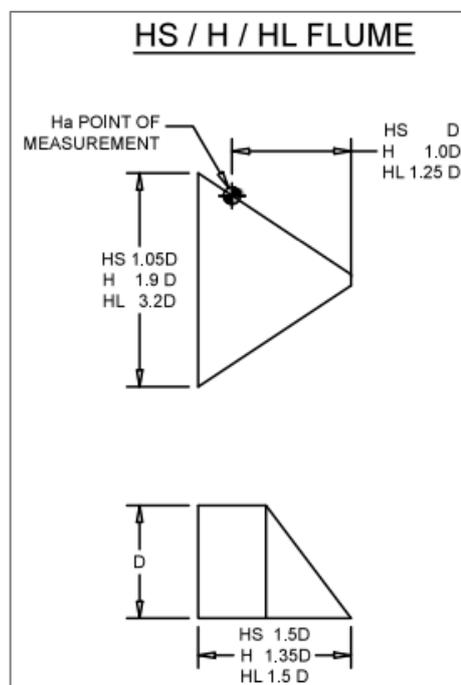


Figure 21 : détails des caractéristiques géométriques du convergent et du point de mesure de la hauteur d'eau pour respecter la courbe de tarage

¹⁰ <https://www.openchannelflow.com>

Le Hs-Flume 0.8 Ft possède les spécifications suivantes :

- Hauteur d'eau minimum pour la mesure = 0,61 cm
- Hauteur d'eau maximum pour la mesure = 24,08 cm
- Débit minimum mesurable = 0,0085 l/s
- Débit maximum mesurable = 12,94 l/s

A titre de comparaison, le Hs-Flume 0,6 Ft qui est le gabarit juste en dessous possède les caractéristiques suivantes :

- Hauteur d'eau minimum pour la mesure = 0,61 cm
- Hauteur d'eau maximum pour la mesure = 17,98 cm
- Débit minimum mesurable = 0,0065 l/s
- Débit maximum mesurable = 6,259 l/s

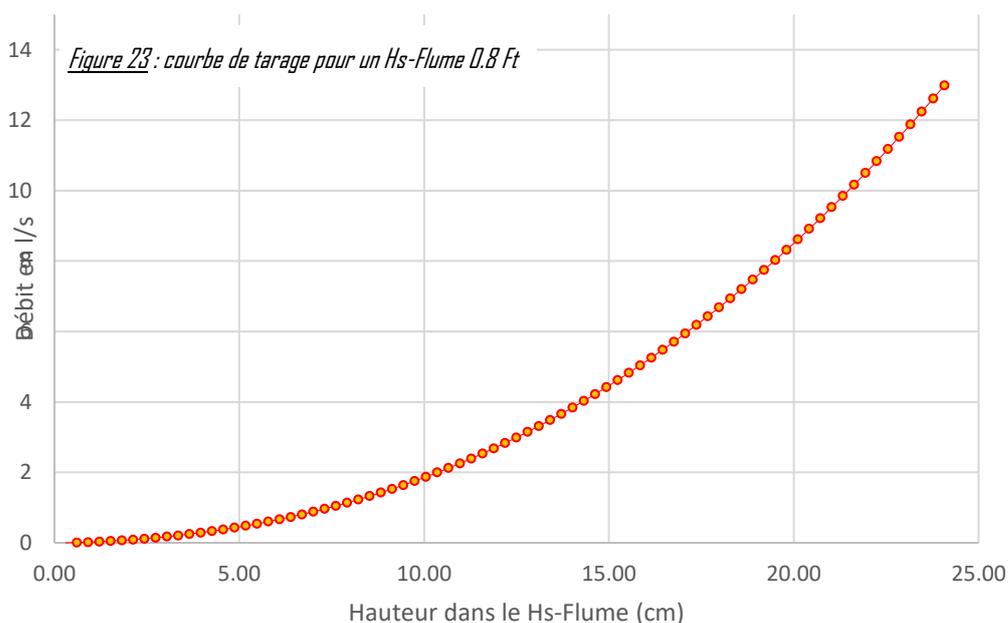
On constate que le Hs-Flume 0.6 Ft ne permet pas de couvrir toute la gamme de mesure voulue ([0 – 10 l/s]).

Le Hs-Flume 0.8 Ft est donc le gabarit le plus adapté au projet d'instrumentation des parcelles d'érosion de CERBERE.

La courbe de tarage du Hs-Flume 0.8 Ft est renseignée sur la [Figure 23](#).



Figure 22: Hs-Flume et son canal d'approche fabriqués en régie; l'utilisation de contre-plaqué permet de réduire les coûts et facilite la réalisation.



➤ CHOIX DU MATERIEL DE MESURE DU NIVEAU D'EAU

La mesure de la hauteur d'eau dans le canal jaugeur peut se faire soit manuellement, soit automatiquement.

Compte tenu du temps de réponse très court des parcelles d'érosion (entre 2 min et 6 min), il est indispensable de procéder automatiquement à une mesure à un faible pas de temps.

Etant donné le caractère « recherche » du projet, on n'a pas de besoin d'avoir les données en temps réel. Pour cela, nous avons fait le choix de ne pas télétransmettre les données des capteurs, ce qui simplifie l'installation (pas de coûts de carte SIM, pas besoin d'installer une alimentation autonome, moins de risque de vandalisme).

La mesure automatique peut se faire à l'aide des plusieurs types de technologies : mesure piézométrique, mesure non intrusive par ultrasons, mesure non intrusive par radar. Ces deux dernières technologies nécessitent l'ajout d'une alimentation autonome.

Pour simplifier au maximum l'instrumentation, dans un souci de réduction des coûts et d'apporter une bonne robustesse aux équipements, nous avons retenu la mise en place d'une sonde de mesure du niveau d'eau (mesure piézométrique).

L'instrument de mesure du niveau d'eau doit permettre d'offrir le meilleur compromis parmi les objectifs suivants :

- avoir une plage de mesure au moins égale à l'amplitude maximale à mesurer (de 0 à 30 cm environ) ;
- permettre une mesure précise (de l'ordre du mm) ;
- avoir une très faible dérive dans le temps (écart avec l'étalonnage) ;
- disposer d'une grande autonomie dans le temps en termes d'énergie et de mémoire d'acquisition (plusieurs 1 mois) ;
- être suffisamment robuste pour une installation en milieu naturel (résister aux fortes températures, au passage rapide du feu, aux vents forts) ;
- être discret pour limiter le risque de vandalisme ;
- être le moins coûteux possible, et facilement disponible en cas de nécessité de remplacement ;
- être peu sensible aux phénomènes d'ensablement ;
- posséder une solution logicielle simple pour le paramétrage et le déchargement des données.

La sonde de mesure retenue est la Level Troll 500 de la marque InSitu (Figure 24). Cette sonde est de la dimension d'un gros stylo, avec un diamètre de 1,83 cm et une longueur de 21,6 cm.

Le corps de la sonde est composé de titane et la cellule de mesure en céramique. La batterie interne est de type lithium 3,6 V.



Figure 24 : sonde LevelTroll 500 et son puits de mesure départé

La durée de vie de la batterie est d'environ 10 ans en utilisation normale. La mémoire interne permet l'acquisition de 120 000 enregistrements. Avec une mesure choisie toutes les 5 minutes, la mémoire permet d'enregistrer les informations pendant plus de 200 jours.

L'interface smartphone VuSitu permet un paramétrage et un déchargement simplifié des sondes. Le faible diamètre de la sonde permet de l'insérer facilement et discrètement dans un puits de mesure déporté.

Le modèle retenu permet une mesure sur la gamme 0-3,5 m. La sonde est ventilée, ce qui signifie que la pression hydrostatique est automatiquement corrigée par la pression atmosphérique. La précision annoncée de la sonde est de +/- 1,75 mm ce qui est pleinement satisfaisant par rapport aux grandeurs à mesurer. Afin de corriger les inconvénients liés à la présence de la sonde dans le canal (perturbation des écoulements dans un gabarit étalonné), il est préconisé d'installer le capteur dans un puits de mesure dédié.

Compte tenu que le gabarit du Hs-Flume possède une géométrie bien définie, la mesure de la hauteur d'eau ne doit pas être perturbée par la présence de la sonde dans le canal jaugeur. Pour cela, il est indispensable d'installer la sonde dans un puits de mesure déporté.

Ce puits présente plusieurs avantages. Il permet non seulement de garantir la courbe de tarage qui lie la hauteur d'eau et le débit associé, mais aussi de tranquilliser les fluctuations de la surface de l'eau et par conséquent moyenner la mesure.

La *Figure 25* illustre l'installation de la sonde de pression hydrostatique dans le puits de mesure du canal. Afin de mesurer les faibles débits (et donc les faibles hauteurs d'eau), il est recommandé de positionner la sonde de mesure en dessous de la cote du fond de canal. Cette configuration confère une prédisposition à l'ensablement, mais compte tenu de l'entretien régulier du dispositif, le phénomène d'ensablement est peu impactant sur la qualité des mesures de hauteurs d'eau.

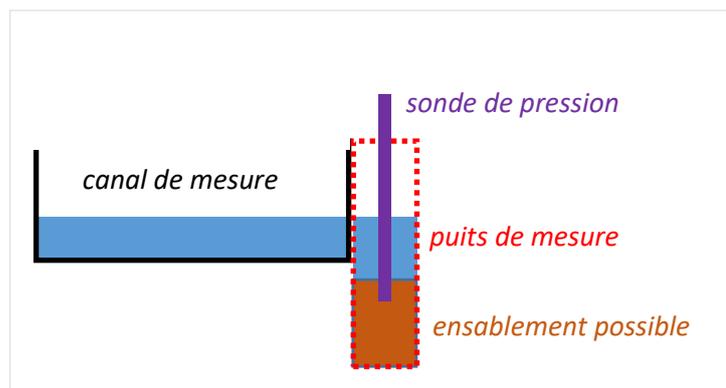


Figure 25 : schéma d'installation de la sonde dans son puits de mesure

2.2.4.4 MESURE DE LA CHARGE SEDIMENTAIRE

➤ PRINCIPE DE LA MESURE

La charge sédimentaire provenant des parcelles d'érosion sera de trois types :

- Les matières en suspension (MES) qui représenteront un volume significatif et ne peuvent être quantifiées que par le biais de la mesure de turbidité des écoulements (ou par échantillonnages puis analyse de la concentration des échantillons) ;
- La charge solide de fond qui se manifestera par un ensablement du fond du dispositif ;
- Les dépôts anarchiques qui se déposeront dans le collecteur en pied de parcelle (aiguilles de pins, brindilles, mottes de terre, cailloux).

Dans le cadre du projet, compte tenu de l'intermittence des écoulements et des difficultés techniques de mesurer avec précision les MES, nous faisons le choix de ne mesurer que les sédiments grossiers (sables et cailloux).

De cette manière, même si nous ne mesurons pas l'intégralité du volume sédimentaires érodé, nous pouvons comparer en relatif la même variable (charge grossière) entre la parcelle témoin et les parcelles incendiées.

➤ CHOIX DES EQUIPEMENTS DE MESURE

Afin de collecter la charge grossière, nous avons disposé un bac de décantation immédiatement en aval du collecteur de la parcelle (Figure 26). Ce bac de forme cubique de 80 cm de côté permet aux écoulements de se décharger de la fraction solide avant de rejoindre le canal d'approche, puis le Hs-Flume pour la mesure du débit liquide.

La charge solide en fond ne sera pas quantifiée de manière continue, mais plutôt pendant les visites d'entretien qui se font souvent après des épisodes pluvieux significatifs. Les dépôts peuvent se faire dans le bac décanteur, mais également dans le canal d'approche plus en aval, comme illustré sur la

Les dépôts sont collectés périodiquement pendant les visites d'entretien à l'aide d'une brosse et d'une pelle. Ils sont ensuite séchés naturellement et les éléments de végétation sont enlevés. Ces dépôts sont ensuite pesés avec une balance de précision afin de déterminer leur masse.

Initialement, dans la partie conception du bac de sédiment, il était envisagé de mettre en place des chicanes et grilles de filtration afin de favoriser les dépôts des matériaux.

A l'usage, il s'est révélé que ces dispositifs n'étaient pas indispensables et le bac a été laissé « vide » afin de faciliter les opérations de nettoyage.



Figure 26 : vue du bac décanteur et du canal d'approche, avec au fond le Hs-Flume. Au premier plan on aperçoit les bordures de la parcelle et le paillason qui fait la transition entre le sol naturel et le dispositif de mesure.

2.2.4.5 OBSERVATION DES PROCESSUS ET SUPERVISION

➤ PRINCIPE DE LA MESURE

Les objectifs de l'observation visuelle des parcelles d'érosion sont multiples :

- **Observer** le débitmètre en fonctionnement et **confirmer** la véracité des informations issues des sondes de hauteurs d'eau ;
- Suivre la **dynamique naturelle de recolonisation de la végétation** qui est un marqueur de l'importance de l'érosion ;
- Procéder à ces observations sur chacune des parcelles d'érosion ;
- Permettre la **supervision des équipements** et dissuader les actes de vandalisme.

➤ CHOIX DU MATERIEL D'OBSERVATION

Compte tenu de la fréquence des visites d'entretien (au moins 8 fois par an), et afin de limiter les coûts de fonctionnement (3 cartes SIM à environ 30 €/mois chacune), nous n'avons pas envisagé de télétransmettre les images.

Les observations sont réalisées à l'aide d'Appareils Photographiques Numériques (APN) de type pièges photographiques. Le mode TimeLapse toutes les 30 minutes, combiné à des déclenchements en présence de mouvements, permet de suivre très régulièrement le fonctionnement des équipements.

Le matériel utilisé est le modèle SG 2060X de la marque BOLYGUARD. Il permet d'obtenir des images de qualités variables (faible/moyenne/haute). Cet APN permet de prendre des prises de vue la nuit grâce à un flash infrarouge.

Sur les parcelles incendiées, les APN ont été installés sur des supports de type étais de maçon. Sur la parcelle témoin, l'APN est installée sur un arbre. La [Figure 27](#) illustre l'implantation type d'un APN et la qualité des images en configuration de jour et de nuit.

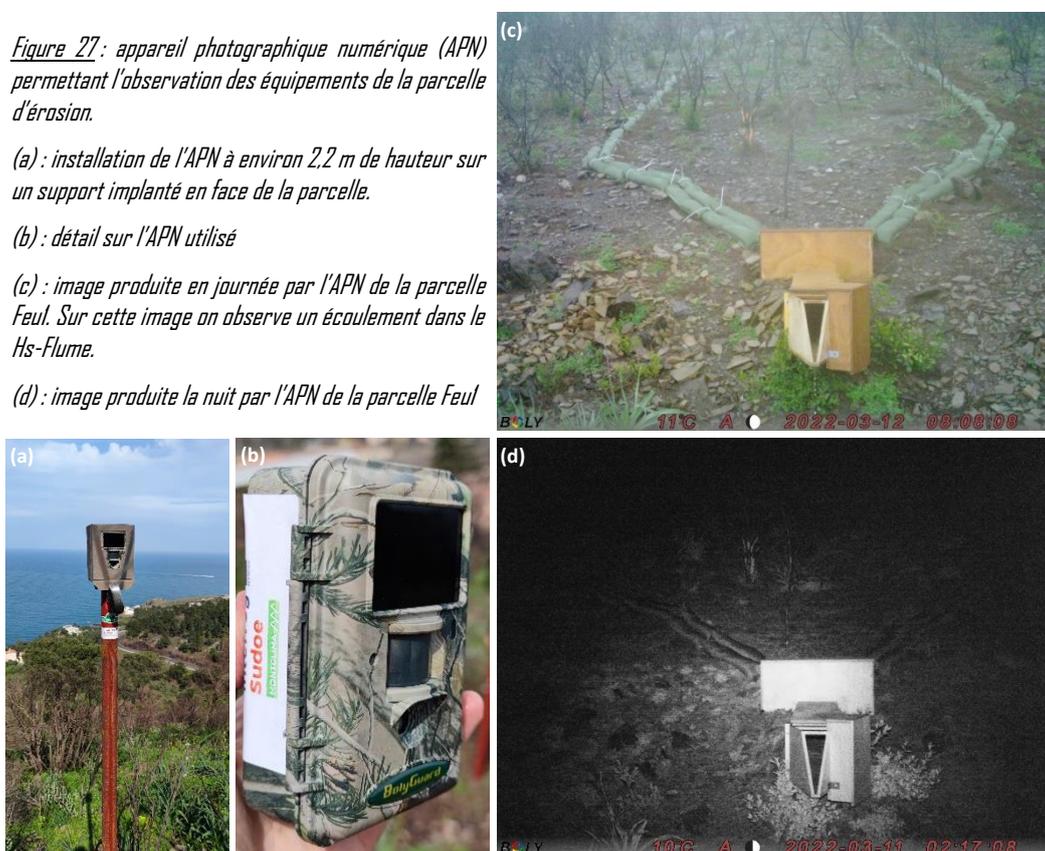
Figure 27 : appareil photographique numérique (APN) permettant l'observation des équipements de la parcelle d'érosion.

(a) : installation de l'APN à environ 2,2 m de hauteur sur un support implanté en face de la parcelle.

(b) : détail sur l'APN utilisé

(c) : image produite en journée par l'APN de la parcelle Feul. Sur cette image on observe un écoulement dans le Hs-Flume.

(d) : image produite la nuit par l'APN de la parcelle Feul



2.2.5 MISE EN PLACE DE L'INSTRUMENTATION

Les équipements ont été installés pendant les mois de septembre et octobre 2021. Le dispositif a été **opérationnel le 21 octobre 2021**, soit moins de 3 mois après le feu (31 juillet 2021).

Pendant ces 3 mois, il n'y a pas eu d'épisode de pluie significatif pouvant potentiellement commencer à lessiver les sols. Au moment de l'opérationnalisation du dispositif on peut considérer que l'état des sols brûlés est identique au lendemain de l'incendie, hormis l'érosion éolienne importante sur le secteur qui a transporté les éléments très fins (suie) ainsi que les aiguilles de pins qui ont commencé à tapisser et protéger le sol.

La *Figure 28* présente schématiquement le contenu du dispositif qui est composé de :

- **3 parcelles** de mesure de l'érosion comportant les équipements et les sondes de mesure
 - 1 parcelle parcourue par le feu → **parcelle Feu 1**
 - 1 parcelle parcourue par le feu (plus pentue et plus végétalisée) → **parcelle Feu 2**
 - 1 parcelle non parcourue par le feu → **parcelle Témoin**
- **1 pluviomètre** automatique localisé au barycentre des 3 parcelles d'érosion ;
- **3 appareils photographiques** numériques, regardant chacun des parcelles.

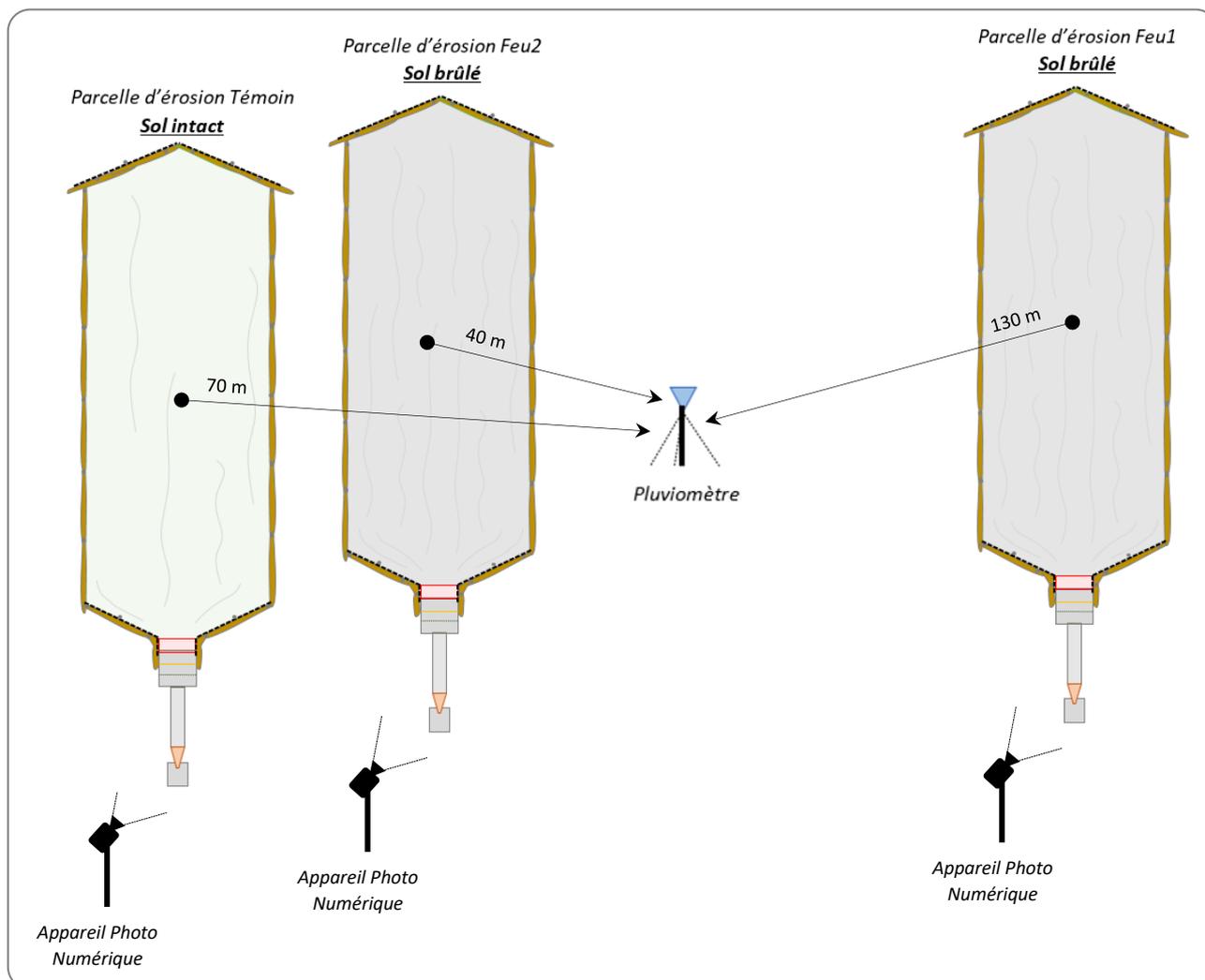


Figure 28 : synoptique du dispositif (principe et équipement) et distance entre les parcelles d'érosion et le pluviomètre

La *Figure 29* présente l'ensemble du dispositif. Les caractéristiques des parcelles sont les suivantes :

	Surface	Pente en long	Distance au pluviomètre	Type de végétation
parcelle Feu 1	115 m ²	44 %	130 m	Maquis arbustif
parcelle Feu 2	107 m ²	53 %	40 m	Maquis arbustif dense
parcelle Témoin	114 m ²	56 %	70 m	Maquis arbustif dense

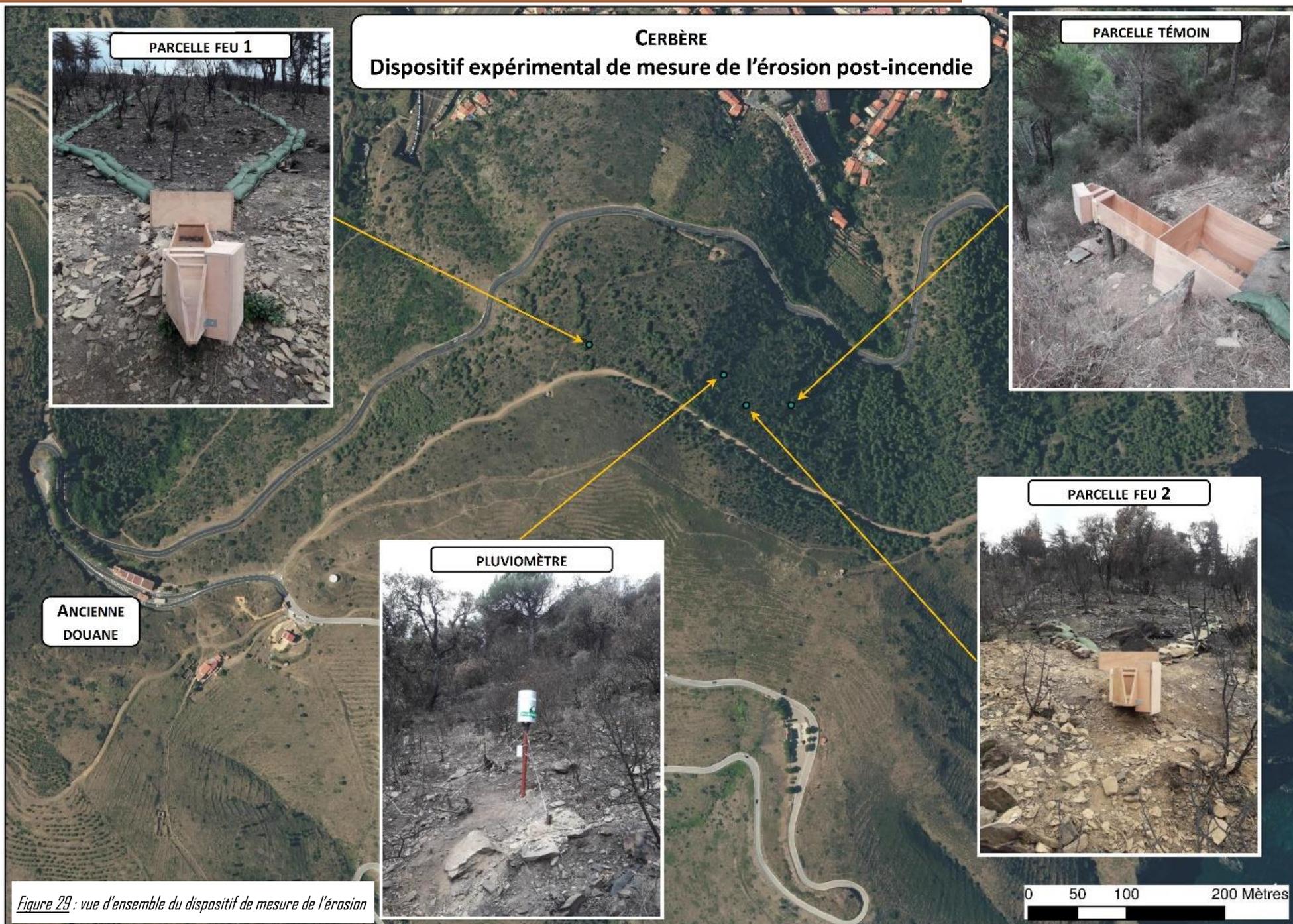


Figure 29 : vue d'ensemble du dispositif de mesure de l'érosion

Les parcelles d'érosion ont été implantées sur la partie supérieure du versant nord de la crête frontalière. Ce versant domine la route départementale RD914 et les habitations de CERBERE (Figure 30).



Figure 30 : vue isométrique du versant incendié et instrumenté de la forêt domaniale de CERBERE : le trait rouge matérialise le contour de l'incendie du 31 juillet 2021 ; les parcelles d'érosion sont matérialisées en jaune. Image : Lidar HD (Géopole, octobre 2022) incrusté sur fond IGN RGEAlt 2021.

Pour une facilité de réalisation, et surtout pour garantir un entretien régulier, ces parcelles ont été implantées en bordure de piste (Figure 31), sans pour autant être perturbées par les ruissellements issus de celle-ci. Contrairement à ce qui est représenté (analyse des images Sentinel au pas spatial de 10 m), la parcelle Témoin se situe intégralement en zone non incendiée.

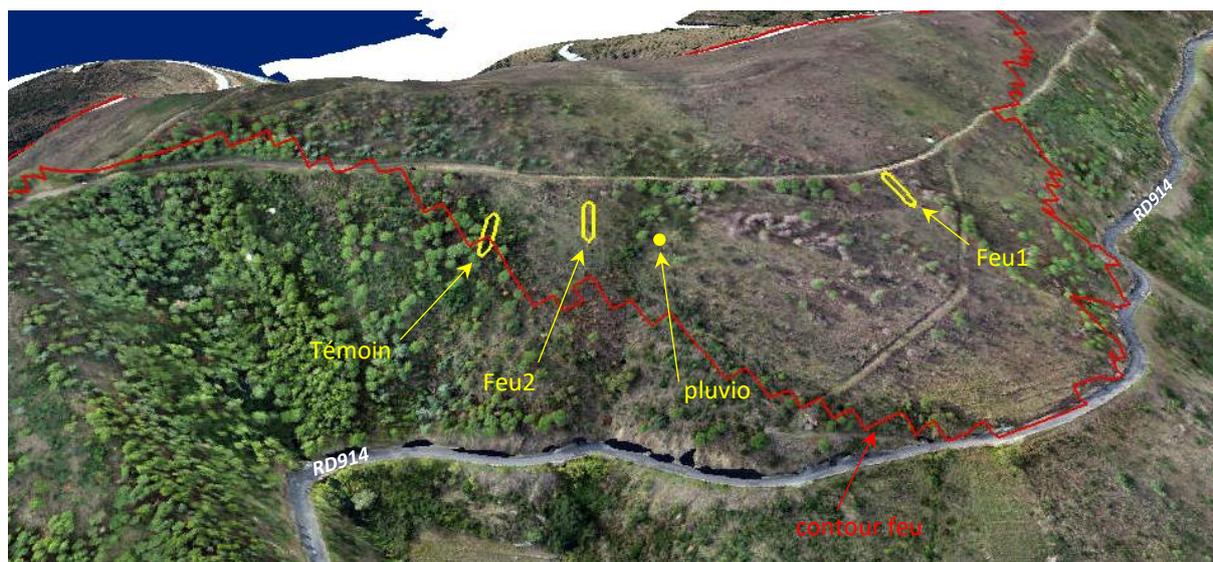


Figure 31 : localisation précise des équipements sur la zone brûlée (parcelle Feu1, parcelle Feu2, pluvia) et sur la végétation non incendiée (parcelle Témoin) – image : orthophotographie prise en octobre 2022 lors de la réalisation du Modèle Numérique de Terrain par Lidar. La limite du feu est réalisée à partir d'un traitement des images des satellites Sentinel (programme européen Copernicus) avec une résolution de 10 m. Contrairement à la représentation, la parcelle Témoin se situe en bordure de l'incendie, et intégralement en zone non brûlée.

Les 3 parcelles d'érosion ont une conception identique, et sont composées de *(Figure 32)* :

- une **parcelle** d'une surface d'environ 100 m² délimitée par des **bordures** posées et tassées sur le terrain naturel (ce choix de bordure posée a été rendue nécessaire car le sol est très caillouteux et des bordures fines ne peuvent pas être facilement fichées). Les bordures en bas de la parcelle forment un convergent pour canaliser les eaux vers le dispositif de mesure ;
- un **bac de sédimentation** en bois de 80 cm de côté qui reçoit les écoulements. Les matériaux grossiers (sables et cailloux), ainsi que les débris végétaux se déposent dans ce bac ;
- un **canal d'approche** de 1,2 m de long qui permet de canaliser les écoulements,
- un **débitmètre de type Hs-Flumes** 0,8 foot, avec son puits de mesure déporté. Le puits de mesure reçoit une **sonde de mesure de niveau d'eau** (LevelTroll 500 de la marque INSITU). La forme spécifique du débitmètre permet de connaître le débit à partir de la hauteur d'eau mesurée ;
- un **appareil photographique automatique** (time lapse et détection de mouvement) qui permet de capturer les écoulements qui sortent du débimètre.

Sur la partie terminale de la parcelle, à l'interface entre le terrain naturel et les équipements, les bordures forment un convergent, passant d'une largeur de 5 mètres à environ 80 cm. Ce convergent permet de diriger les flux liquides et solides vers les équipements de mesure.

Cette interface est souvent source de contamination en sédiments à cause des travaux ; le passage d'un sol rugueux à une surface lisse favorise localement les ravinements et la formation de sillons qui faussent les grandeurs à mesurer. Pour résoudre ce problème, il a été plaqué au sol une moquette afin de constituer une transition progressive de la rugosité et limiter ce phénomène de ravinement avant le bac de décantation *(Figure 33 et Figure 34)*.

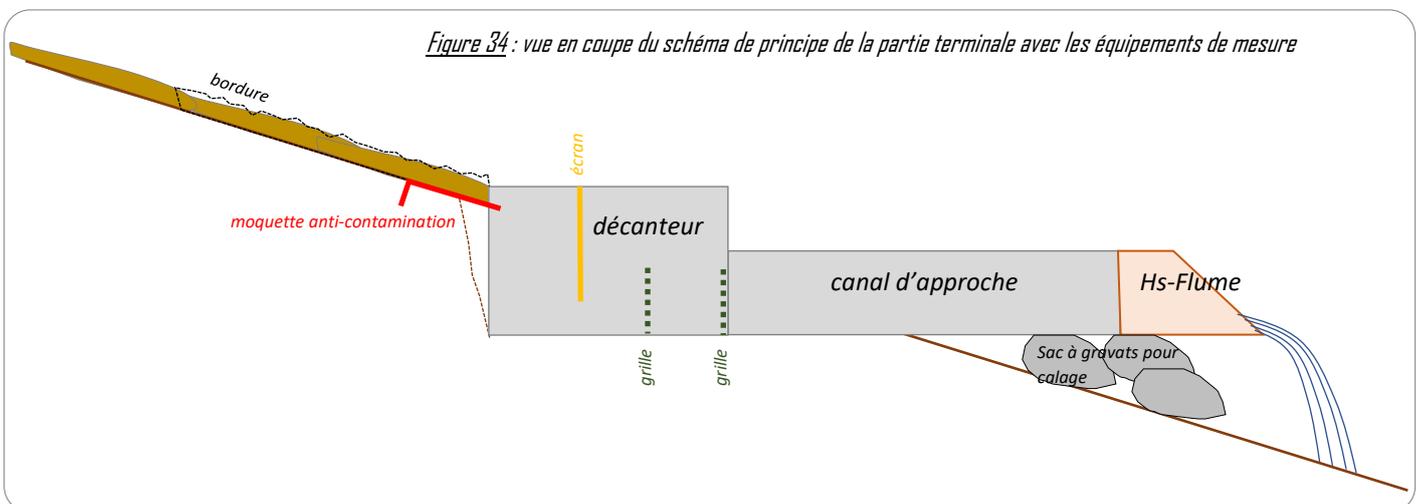
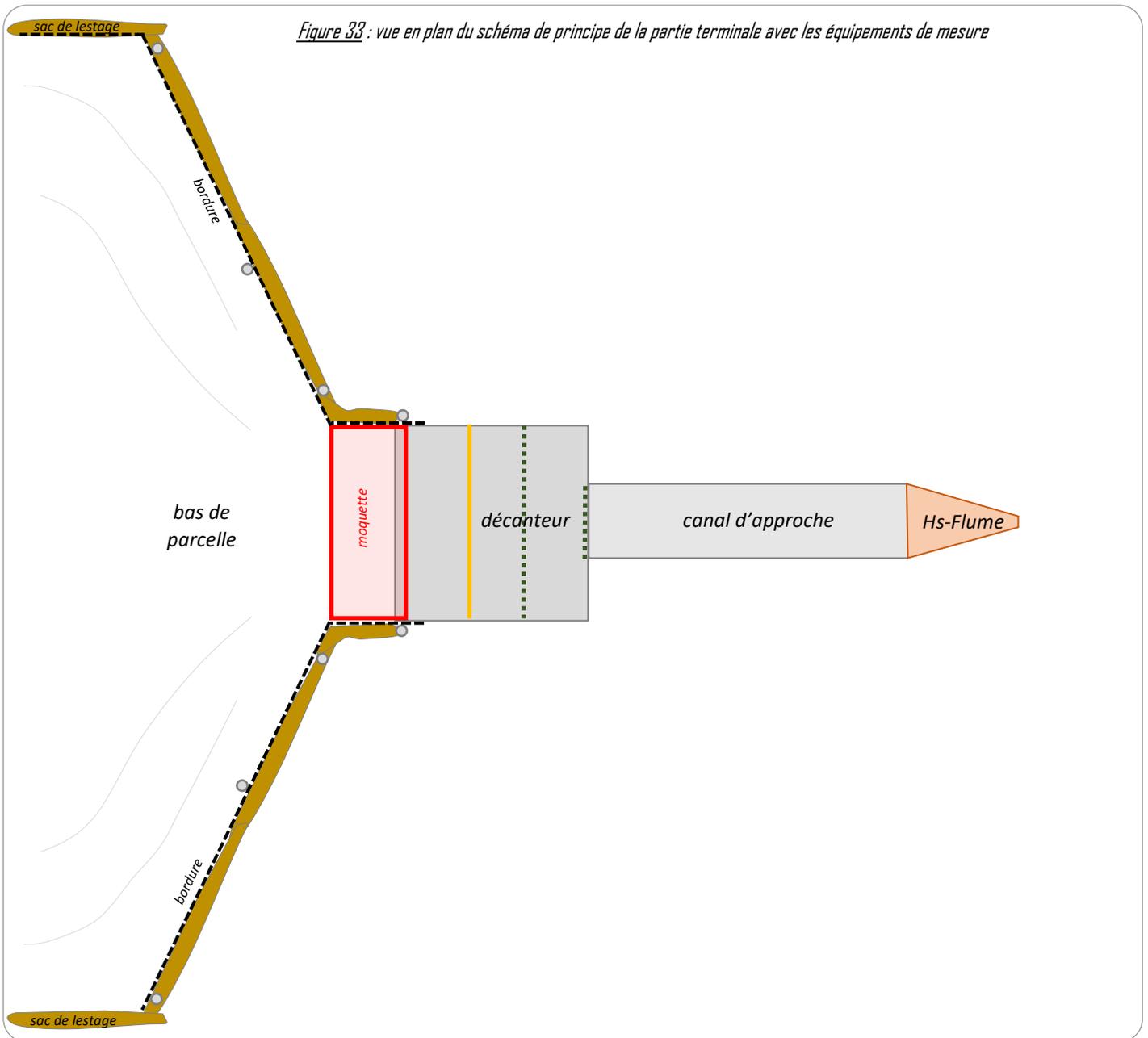
Une fois les écoulements concentrés par le convergent, ils chutent dans le décanteur (ou bac de sédimentation). Le décanteur permet aux éléments solides (sables et graviers) de se déposer au fond. Dans la phase de conception, il était prévu de mettre en place des grilles pour retenir les flottants afin qu'ils ne perturbent pas la mesure de débit. Finalement, les premières semaines de fonctionnement ont montré que ces grilles n'étaient pas indispensable du fait de la faible proportion de flottants mobilisés. Cette absence de grille présente l'avantage de simplifier les opérations d'entretien.

Le décanteur se poursuit par le canal d'approche dont la fonction est de bien canaliser les eaux pour permettre une bonne mesure du débit.

Le canal d'approche ainsi que le Hs-Flume sont installés quasiment à l'horizontal, avec une pente en long qui ne doit pas excéder 1 %. **Ces deux éléments ont été implantés avec précision.** Leurs assises ont été consolidées afin qu'elles ne se tassent pas avec le temps. Un agencement de pierres et de sacs de sable ont permis de les caler en altimétrie. En pied du Hs-Flume, des pierres ont été disposées afin de restituer les écoulements dans le milieu naturel sans que cela provoque des affouillements pouvant déstabiliser le Hs-Flume.



Figure 32 : illustration des équipements qui constituent une parcelle d'érosion



Pour ce projet, l'ONF a procédé à l'achat de tous le matériels (instruments, matériaux pour la fabrication des équipements, quincaillerie, etc.), ainsi que la construction des caissons en contre-plaqué marine (bac de décantation, canal d'approche, Hs-Flume).

L'entreprise CUTILLAS, a réalisé les travaux sur 4 jours, à concurrence de 18 Hommes-Jours pour la mise en place des 3 parcelles et de l'installation du support du pluviomètre (Figure 35).

Grace à la proximité de la piste, une parcelle peut être réalisée quasiment en une seule journée : délimitation au cordeau, pose des bordures, terrassements pour installer les caissons, pose du décanteur et du canal d'approche, mise à niveau des équipements.

piquetage Feu1 – 6 oct. 2021



transport des bordures – 6 oct. 2021



caissons Feu1 - 6 oct. 2021



terrassement Témoin - 7 oct. 2021



caissons Témoin - 7 oct. 2021



Figure 35 : installation des équipements en octobre 2021 par l'entreprise CUTILLAS, avec de haut en bas et de gauche à droite :

- délimitation de la parcelle Feu1 avant la pose des bordures ;
- transports des bordures préremplies en atelier ;
- terrassements et installation à niveau des caissons de la parcelle Feu1 ;
- terrassement pour les équipements de la parcelle Témoin ;
- installation des caissons de la parcelle Témoin. Compte tenu de la pente de la présence d'une dalle rocheuse, ils sont installés sur des piquets en acacia.
- terrassements et installation à niveau des caissons de la parcelle Feu2

terrassement Feu2 - 7 oct. 2021



Pour faciliter le montage et limiter le risque de casse, le dispositif a été conçu en individualisant les éléments. Le décanteur, le canal d'approche et le Hs-Flume sont ensuite accolés les uns aux autres à l'aide de tiges boulonnées.

La quatrième journée a permis d'installer les Hs-Flume sur les canaux d'approche, ainsi que de renforcer les bordures avec des liens et fers à béton fichés dans le sol, ainsi que la pose. Le support haubané du pluviomètre a également été installé.



Les puits déportés des Hs-Flume, ainsi que les récipients et les sondes de niveau d'eau ont été installés le 21 octobre 2021 (Figure 37).



Figure 36 : pluviomètre installé le 21 oct. 2021

Le pluviomètre, plus fragile, a été installé en régie sur son support le 21 oct. 2021 (Figure 36), puis calibré. Les supports des APN ont été installés en régie pendant une visite d'entretien du dispositif, bien plus tard vers le 20 mai 2021 à cause d'un long délai d'approvisionnement du fournisseur (Figure 38).

Figure 37 : puits déporté et sonde de mesure



Figure 38 : APN installés en face de chacune des parcelles. Sur les parcelles Feu1 et Feu2, l'installation d'un support haubané a été nécessaire. Sur la parcelle Témoin, la présence d'un pin juste en face de la parcelle a permis de l'utiliser comme support.

2.2.6 OPERATIONNALISATION ET MAINTENANCE

Malgré une grande attention portée sur la qualité des équipements et des instruments, ainsi que leur mise en œuvre, la **qualité des données produites** par les instruments dépend fortement de la calibration initiale et **surtout de l'entretien périodique du dispositif**.

2.2.6.1 CALIBRATION INITIALE

La première chose à faire est de bien vérifier la solidité du support et la tension des haubans, ainsi que l'horizontalité dans le plan de l'ouverture circulaire de réception des pluies.

Le pluviomètre à double augets PLV400 est déjà calibré en usine. Lors de la mise en place dans le dispositif, il s'agit de vérifier le libre mouvement mécanique des augets, ainsi que de la propreté des orifices (Figure 39). Le pluviomètre est raccordé à un enregistreur de données autonome. Ce dernier doit être paramétrer en heure universelle (UTC) plus commode pour gérer les changements d'heure. Le pas de temps retenu est de 6 minutes et l'unité de mesure est le millimètre. Pour rappel, chaque basculement de augets équivaut à une lame d'eau précipitée de 0,2 mm.



Figure 39 : détails sur le mécanisme du pluviomètre

Les sondes de mesure du niveau d'eau dans le Hs-Flume se situent dans leurs puits déportés respectifs (Figure 40). Le principe du puits est de permettre de conserver le gabarit du Hs-Flume (la sonde ne fait pas obstacle, et donc ne modifie pas la courbe de tarage). Ce puits est connecté au Hs-Flume grâce à un passe paroi. Par ailleurs, la membrane en céramique qui permet de mesurer la pression, et donc la hauteur hydrostatique, se situe à presque 2 centimètres du bord de la sonde (dénommée « cul de sonde »). Afin de pouvoir obtenir une mesure dès la présence des premiers écoulements, le puits déporté est installé en-dessous du radier du Hs-Flume. Ce puits est connecté grâce à un passe paroi.

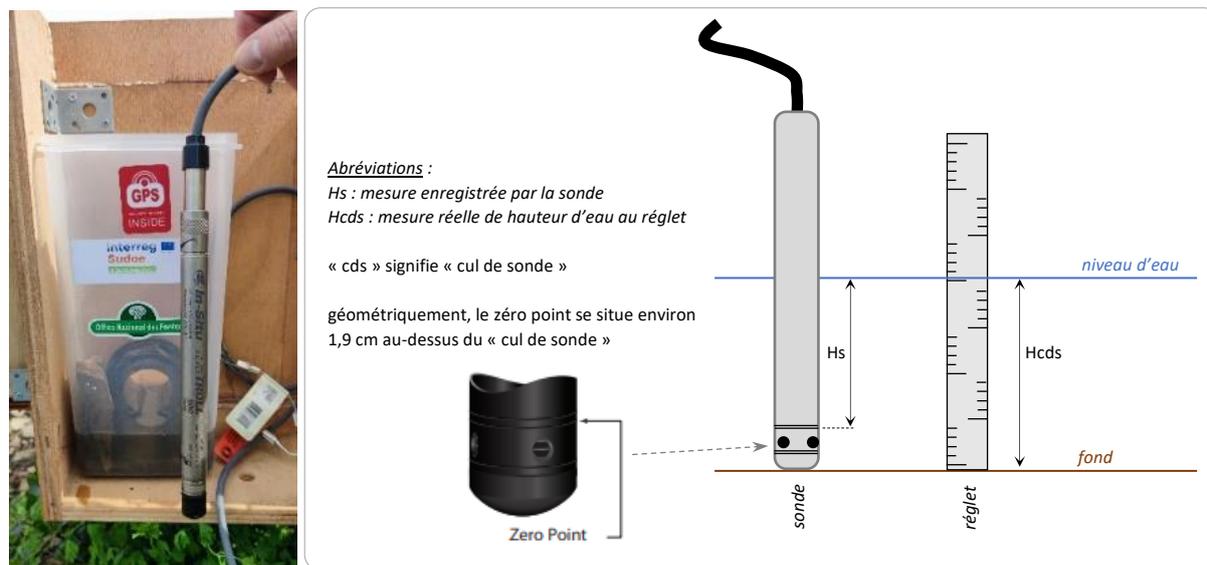


Figure 40 : installation d'une sonde de mesure de niveau d'eau dans son puits déporté. La véritable hauteur d'eau dans le Hs-Flume est différente de celle enregistrée par la sonde automatique. Cet écart est déterminé à chaque visite d'entretien.

La *Figure 40* illustre bien la position du puits déporté par rapport au Hs-Flume : tandis que le niveau d'eau est affleurant sur le radier du Hs-Flume, la sonde est immergée dans environ 5 cm d'eau calme. De cette manière, les débuts de ruissellement sont bien mesurés par la sonde et les valeurs mesurées sont moyennées (pas de données aberrantes à cause du batillage).

La *Figure 40* permet également de définir les grandeurs comparatives à prendre en compte pour obtenir la véritable hauteur de hauteur d'eau dans la Hs-Flume utilisable pour l'évaluation du débit ruisselé.

Lors de chaque visite d'entretien, et pour chaque parcelle, la sonde est retirée de son puits pour nettoyer la membrane en céramique. Lors de la réinstallation de la sonde dans son puits de mesure, une comparaison est faite entre les variables H_s et H_{cds} de manière à vérifier qu'il n'y a pas de dérive de la sonde (évolution dans le temps de l'écart entre ces deux grandeurs).

En ce qui concerne les Appareils Photographiques Numériques, une calibration initiale a été nécessaire pour choisir le cadre de prise de vue ainsi que la qualité et la fréquence des images afin de trouver le meilleur compromis en termes de gestion de l'énergie et de capacité de stockage sur les cartes mémoires.

2.2.6.2 MAINTENANCE

La maintenance d'un dispositif expérimental de mesure de l'érosion est indispensable pour garantir la bonne qualité des données des instruments. La mesure intrusive des écoulements chargés en sédiments provoque un risque potentiellement fort de colmatage partiel ou total des orifices des sondes de pression hydrostatique. Le nettoyage régulier de ces sondes, ainsi que la vérification du bon fonctionnement sont impératifs.

Par ailleurs, lors de la conception du dispositif, la périodicité de la maintenance a été anticipé pour le choix des instruments : le déchargement des données doit être régulier. A titre d'exemple, le choix du pas de temps d'acquisition de 6 minutes pour le pluviomètre impose un téléchargement des données tous les 67 jours au maximum. Au-delà de ce délai, les anciennes données sont écrasées.

Enfin, le principe de faire des bilans volumiques sédimentaires plutôt qu'une mesure en continue nécessite de prélever régulièrement les matériaux qui se déposent dans les bacs de décantation.

Depuis l'opérationnalisation du dispositif le 21 octobre 2021, nous avons procédé à 8 visites de maintenance, soit 1 visite tous les 1,5 mois. Il s'agit d'une moyenne, sachant qu'après une pluie remarquable, le dispositif est visité assez rapidement.

Lors des visites de maintenance, on prévoit non seulement le matériel pour décharger et reparamétrer les instruments le cas échéant (ordinateur portable, module Bluetooth INSITU, balayette et pelle), mais également du matériel plus spécifique pour pouvoir faire des réparations sur les caissons ou sur les supports du pluviomètre et des APN (*Figure 41*).

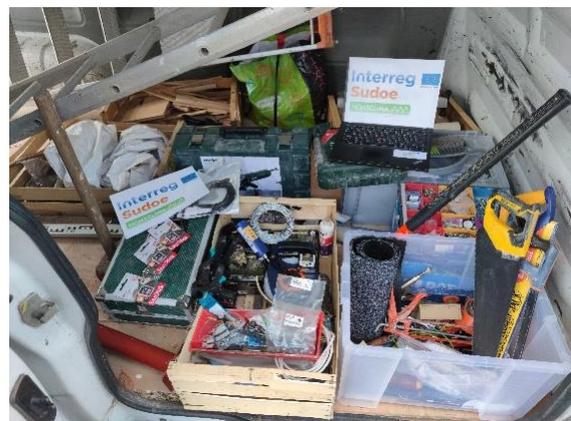


Figure 41 : matériels de maintenance pour le suivi et les éventuelles réparations

Pendant une visite de maintenance, le dispositif est parcouru afin de déceler visuellement les éventuels désordres. Ensuite, au fur et à mesure du parcours, les instruments sont déchargés et vérifiés. La *Figure 42* donne un panel des interventions réalisées pendant ces visites de maintenance.



Figure 42: équipements visités pendant la maintenance périodique et points de vigilance.

- (a) : contrôle visuel général, déchargement du pluviomètre, vérification de la synchronisation de l'heure et de l'état de charge des piles

- (b) : contrôle visuel général, nettoyage de la sonde, déchargement des données et synchronisation de l'heure

- (c) : les puits sont rapidement secs à cause de l'évaporation (vent très fréquent). Une remise en eau est nécessaire, avec contrôle des hauteurs

- (d) : contrôle visuel général et prélèvement des sédiments dans les bacs de décantation

- (e) : vérification du bon état des bordures

Les temps de téléchargement des sondes étant assez longs comptes tenus du nombre importants de données, il faut en général compter une durée d'une heure pour la maintenance complète d'une parcelle d'érosion.

En ce qui concerne les APN, la durée d'acquisition est très variable, en fonction du nombre de mouvements qui se produisent devant le détecteur. Au printemps, la sensibilité du détecteur était trop forte, et la végétation agitée par le vent déclenchait des prises de vue trop souvent. La mémoire a alors très vite été saturée et les piles déchargées (durée de fonctionnement de l'ordre de seulement 1 mois). La sensibilité a alors été diminuée et la taille des images amoindrie.

3 LES RESULTATS DES MESURES

L'expérimentation a été initiée au cours de l'automne 2021 et est toujours en fonctionnement à ce jour. Les résultats présentés ci-après concernent la période allant du 21/10/2021 au 17/09/2022, c'est-à-dire sur une durée de presque 1 an. Seule une saison hydrologique (automne 2021 – printemps 2022) a été étudiée. Les résultats restent donc assez peu consolidés mais permettent néanmoins de mettre en évidence des tendances.

3.1 CONTEXTE PLUVIOMETRIQUE

Avant de procéder à l'analyse des débits ruisselés, il est intéressant de caractériser le régime des précipitations sur cette saison hydrologique 2021/2022 par rapport à la moyenne des autres années.

Le *Tableau 4* liste les épisodes pluvieux enregistrés par le pluviomètre du dispositif. Tous ces épisodes n'ont pas généré de ruissellement sur les parcelles d'érosion. Les durées de ces épisodes sont très variables, allant de moins de 2 heures à plus de 56 heures.

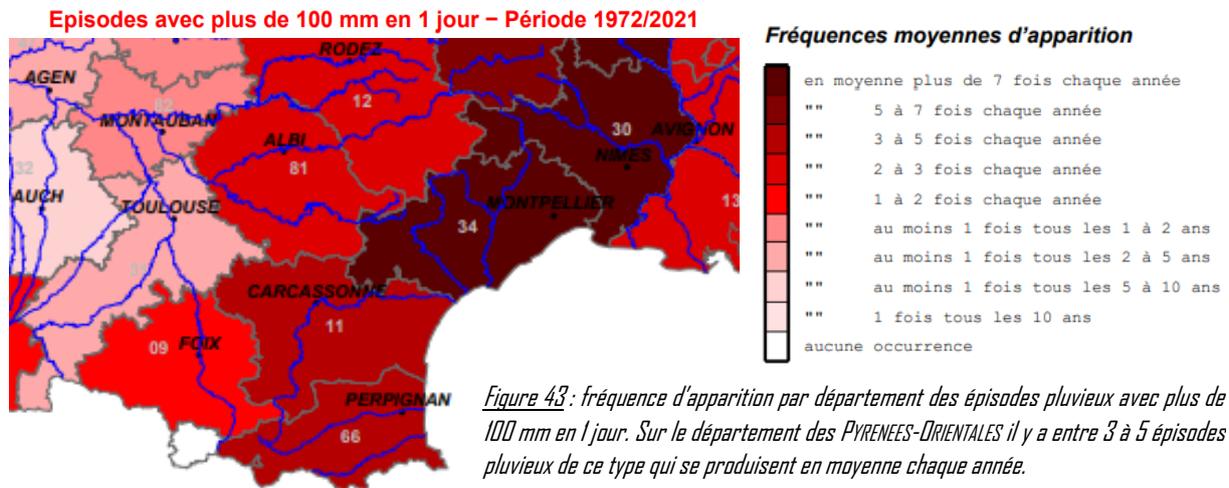
Les intensités horaires maximum sont elles aussi assez disparates, avec des valeurs comprises entre 2 et 56 mm/h. Un seul épisode pluvieux a dépassé un cumul de 100 mm (sur 38 heures).

Tableau 4 : épisodes de pluie significatifs qui se sont produits entre le 21 oct. 2021 et le 17 sept. 2022 (date du dernier relevé).

Episode pluvieux	début	fin	durée (h)	cumul (mm)	cumul max sur 6 min (mm)	intensité max (mm/h)	intensité moyenne (mm/h)	indice de la pluie (*) (mm/h)
10 au 12 nov. 2021	10/11/2021 10H30	12/11/2021 19H12	56,7	62,8	2	20	1,11	4,7
23 et 24 nov. 2021	23/11/2021 12H48	24/11/2021 18H18	29,5	80	5,6	56	2,71	12,3
10 déc. 2021	09/12/2021 22H36	10/12/2021 18H18	19,7	22,8	0,8	8	1,16	3,0
9 et 10 janv. 2022	09/01/2022 19H36	10/01/2022 11H54	16,3	29,8	0,6	6	1,83	3,3
16 fév. 2022	16/02/2022 07H30	16/02/2022 09H12	1,7	2	0,2	2	1,18	1,5
11 au 13 mars 2022	11/03/2022 18H36	13/03/2022 08H42	38,1	100,6	3,4	34	2,64	9,5
20 et 21 mars 2022	20/03/2022 06H06	21/03/2022 07H36	25,5	22,8	1,2	12	0,89	3,3
29 et 30 mars 2022	30/03/2022 02H36	30/03/2022 11H42	9,1	14,2	0,6	6	1,56	3,1
20 au 21 avril 2022	20/04/2022 14H06	21/04/2022 15H06	25	36,2	3,2	32	1,45	6,8
24 mai 2022	-	-	24	19,6	-	-	-	-
3 sept. 2022	03/09/2022 06H30	03/09/2022 08H42	2,2	8	3,6	36	3,64	11,4

(*) : l'indice de pluie est une construction arbitraire pour cette étude afin de déceler un paramètre qui puisse caractériser le début des ruissellements. Cet indice est la racine carrée du produit entre l'intensité moyenne et l'intensité max. Son unité s'exprime en mm/h.

La *Figure 43* représente le nombre d'occurrences observées d'épisodes sur les 50 dernières années ayant apporté plus 100 mm en une journée climatologique sur au moins un point de mesure par département. Sur le département des PYRENEES-ORIENTALES une pluie de cumul journalier de 100 mm se produit en moyenne 3 à 5 fois par an.



extrait issu de <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Nombre-de-jours-par-departement.html>

On ne peut pas comparer stricto-sensu les résultats de la *Figure 43* avec les pluies enregistrées sur le pluviomètre du dispositif de CERBERE, puisque dans le premier cas il s'agit d'une synthèse départementale de tous les postes pluviométriques, et de l'autre il s'agit d'une mesure très localisée. Néanmoins, à l'échelle du département, le nombre d'observations d'événements pluvieux ayant causés dommages est nettement inférieur pendant la saison 2021/2022 par rapport à ce qui a été observé les années précédentes.

L'**automne 2021** et le **printemps 2022** ont **plutôt été calmes en termes d'épisodes pluvieux** sur la côte Vermeille ; les épisodes méditerranéens s'étant plutôt produits sur les Cévennes (Gard et Hérault) à la faveur d'une remontée des masses d'air dans un flux de Sud plutôt qu'un flux de Sud-Est jusqu'alors souvent observé. Cette modification d'orientation des flux fait que les épisodes pluvieux remarquables se produisent plutôt en mer en longeant les côtes catalanes avant d'impacter les premiers contreforts des Cévennes. Cette modification du régime des vents est assez récente (depuis quelques années) et pourrait être un marqueur des modifications du climat.

Les résultats issus d'un dispositif expérimental de suivi de l'érosion en situation réelle après un incendie sont fortement dépendants de l'intensité des pluies qui peuvent se produire. Dans le cas du projet MONTCLIMA, nous n'avons malheureusement pas pu bénéficier de la survenue de nombreux épisodes pluvieux remarquables. Toutefois, certains épisodes ont été suffisamment intenses pour générer des ruissellements mesurables et permettre une évaluation des processus hydro-sédimentaire en fonction de la dégradation des sols.

3.2 AUGMENTATION DE L'HYDROLOGIE

La modification de l'hydrologie sur les terrains incendiés est évaluée par analyse comparative entre les résultats des débits obtenus sur les parcelles Feu (Feu1 et Feu2) avec la parcelle de référence (Témoin).

Les valeurs des débits de ruissellement ne sont pas des données produites directement par les sondes de mesures. Les paragraphes ci-après détaillent la méthodologie de détermination des valeurs de débit à partir de la hauteur d'eau enregistrée par une sonde :

- à partir des données brutes de hauteurs d'eau mesurées dans le puits déporté, une analyse préalable doit être réalisée pour distinguer le fonctionnement normal et les artefacts de mesure liés aux opérations de maintenance ;
- une fois les données brutes analysées, les valeurs des hauteurs brutes doivent être soustraites du « zéro » vérifié à chaque visite de maintenance. On obtient alors la valeur réelle de la hauteur d'eau dans le Hs-Flume ;
- à partir de hauteur d'eau dans le Hs-Flume, il est possible de calculer le débit de ruissellement à partir de la courbe de tarage, puis ce comparer les valeurs obtenus sur les parcelles incendiées avec celles issues de la parcelle Témoin.

3.2.1 DONNEES BRUTES DES HAUTEURS D'EAU

La *Figure 44* représente les mesures des hauteurs d'eau des sondes dans leurs puits déportés respectifs.

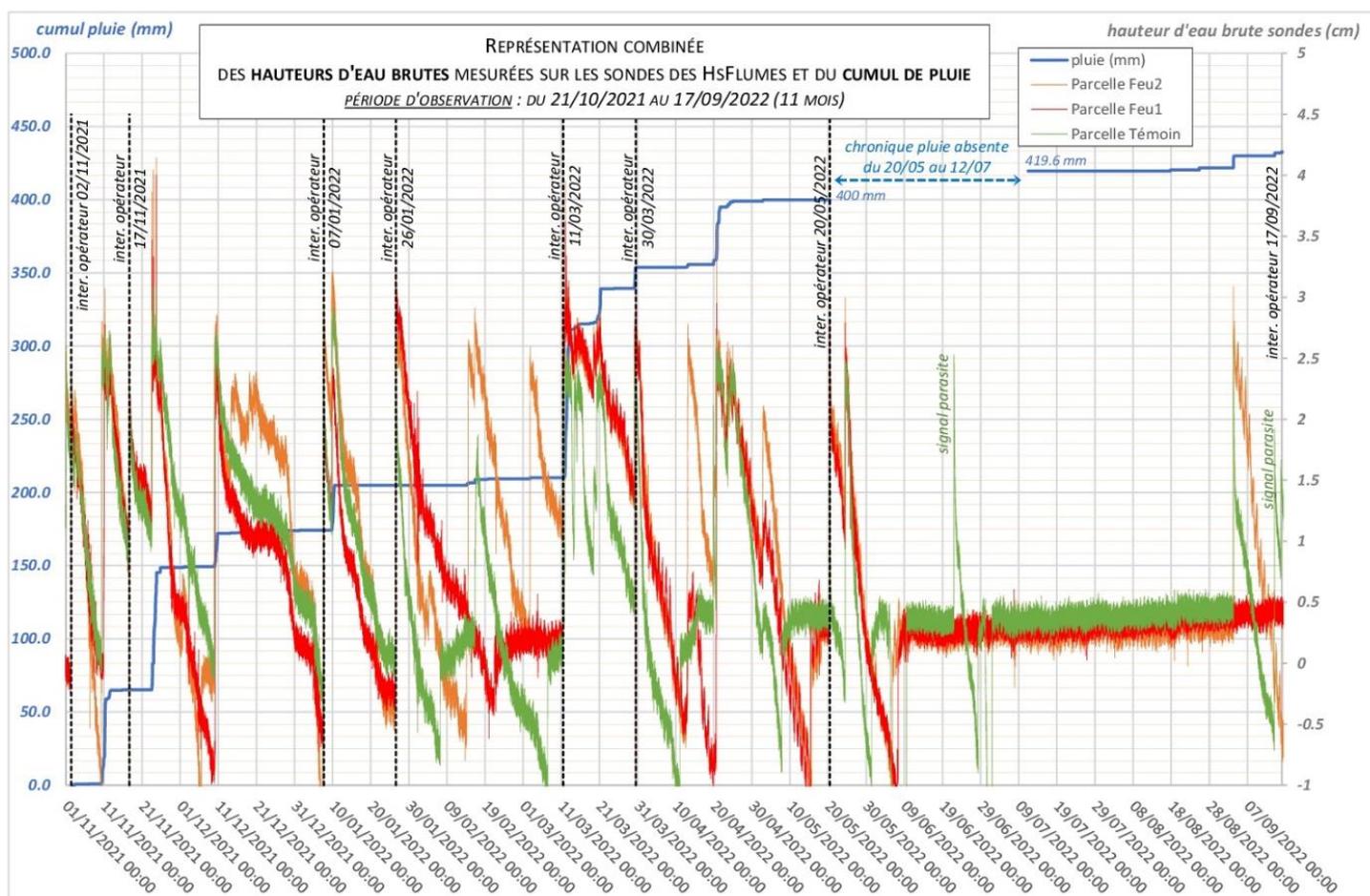


Figure 44 : hauteurs d'eau brutes des sondes de mesure sur les 3 parcelles, ainsi que le cumul de pluie donné par le pluviomètre du dispositif. Les puits de mesure sont remis à niveau pendant les visites de maintenance. Ces visites sont indiquées dans le graphique afin de différencier les mises en eau naturelles (écoulement provoqué par une pluie) avec les artificielles (remise à niveau par l'opérateur pour calibration).

La chronique temporelle couvre une saison hydrologique, entre le 21/10/2021 et le 17/09/2022. Les périodes les plus propices à la mesure des ruissellements sont l'automne et le printemps, où il se produit habituellement des épisodes pluvieux de type méditerranéens.

Sur ce graphique, sont figurés :

- L'évolution du cumul de la pluie sur la saison. En fin de saison on mesure un cumul total de l'ordre de 430 mm. Habituellement, sur ce secteur on enregistre un cumul annuel de l'ordre de 680 mm de pluie (*données MétéoFrance ; procédure Aurélhy – moyenne sur la chronique [1981-2010]*). Cela met en évidence la pluviométrie a été plutôt très déficitaire pendant la période d'expérimentation du projet MONTCLIMA.

Pendant l'été 2022, compte tenu de la météo plutôt clémente, nous n'avons pas fait de visite de maintenance. Compte tenu de volume de mémoire limité pour le pluviomètre, les mesures comprises entre le 20 mai 2022 et le 12 juillet 2022 n'ont pas été enregistrées (uniquement celle du pluviomètre, les sondes restant quant à elles pleinement fonctionnelles). Ce manque de données n'est pas préjudiciable pour l'interprétation des résultats puisqu'aucun ruissellement n'a été enregistré sur les parcelles d'érosion.

- Les valeurs des hauteurs d'eau mesurées dans les puits déportés, avec :
 - en vert, les valeurs issues de la sonde de la parcelle Témoin
 - en rouge, les valeurs issues de la sonde de la parcelle Feu1
 - en orange, les valeurs issues de la sonde de la parcelle Feu2

Avec un pas d'acquisition des mesures toutes les 5 minutes, les allures des courbes sont très « bruitées ». On observe des décroissances rapides et systématiques après chaque mise en eau dans les puits de mesure ; ce phénomène traduit un fort potentiel d'évaporation lié au fait que la zone d'étude est très ventée.

- Les traits noirs verticaux signalent les visites de maintenance. Pendant ces visites, les puits et les sondes sont nettoyés, puis le puits est remis en eau afin de déterminer le niveau « zéro », c'est-à-dire la hauteur d'eau enregistrée par la sonde qui correspond à la cote du radier du Hs-Flume.

Le remise en eau à chaque visite de maintenance se manifeste par une remontée brusque du niveau d'eau de la sonde.

A partir de ces données brutes, on peut faire les observations suivantes :

- les épisodes de pluies constituent bien un forçage qui modifie la hauteur d'eau, avec une montée soudaine de la hauteur d'eau ;
- les visites de maintenance sont bien matérialisées par une montée soudaine de la hauteur d'eau
- les décroissances des courbes de hauteur d'eau sont d'autant plus rapides que la météo est venteuse après un épisode de pluie ;
- le bruitage du signal produit par les sondes est cohérent avec les spécifications du fabricant (précision à + ou - 1,75 mm) ;
- les artéfacts de mesure sont peu nombreux.

3.2.2 HAUTEURS D'EAU DANS LES HS-FLUME

Les hauteurs d'eau mesurées dans les Hs-Flume sont déduites des mesures brutes par soustraction du niveau « zéro » de chaque sonde, et pour chaque période.

A chaque visite de maintenance, la sonde est sortie de son puits, nettoyée, puis remise dans le puits, par forcément exactement au même endroit. Par conséquent, le calage précédent peut-être modifié et il est impératif de définir pour chaque période, le nouveau niveau « zéro » des sondes, de manière à connaître avec précision les hauteurs d'eau réelles dans les Hs-Flume.

Le *Tableau 5* fait la synthèse de l'évolution dans le temps des niveaux « zéro » à prendre en compte pour chacune des sondes. Ces niveaux varient jusqu'à 0,6 cm. Cette variation n'est pas négligeable dans la transformation hauteur-débit, d'où la nécessité de contrôler périodiquement les niveaux « zéro ».

Tableau 5 : valeurs des niveaux « zéro »

		Valeur à soustraire aux hauteurs d'eau « brutes » pour déterminer les hauteurs d'eau réelles dans le Hs-Flume		
chronique		Témoin (en cm)	Feu1 (en cm)	Feu2 (en cm)
du 21/10/2021	au 17/11/2021	2,20	2,20	2,25
du 17/11/2021	au 07/01/2022	2,30	2,25	2,30
du 07/01/2022	au 26/01/2022	2,50	2,40	2,80
du 26/01/2022	au 11/03/2022	2,45	3,00	2,80
du 11/03/2022	au 30/03/2022	2,30	2,80	2,70
du 30/03/2022	au 20/05/2022	2,25	2,90	2,75
du 20/05/2022	au 16/09/2022	2,30	2,30	2,40

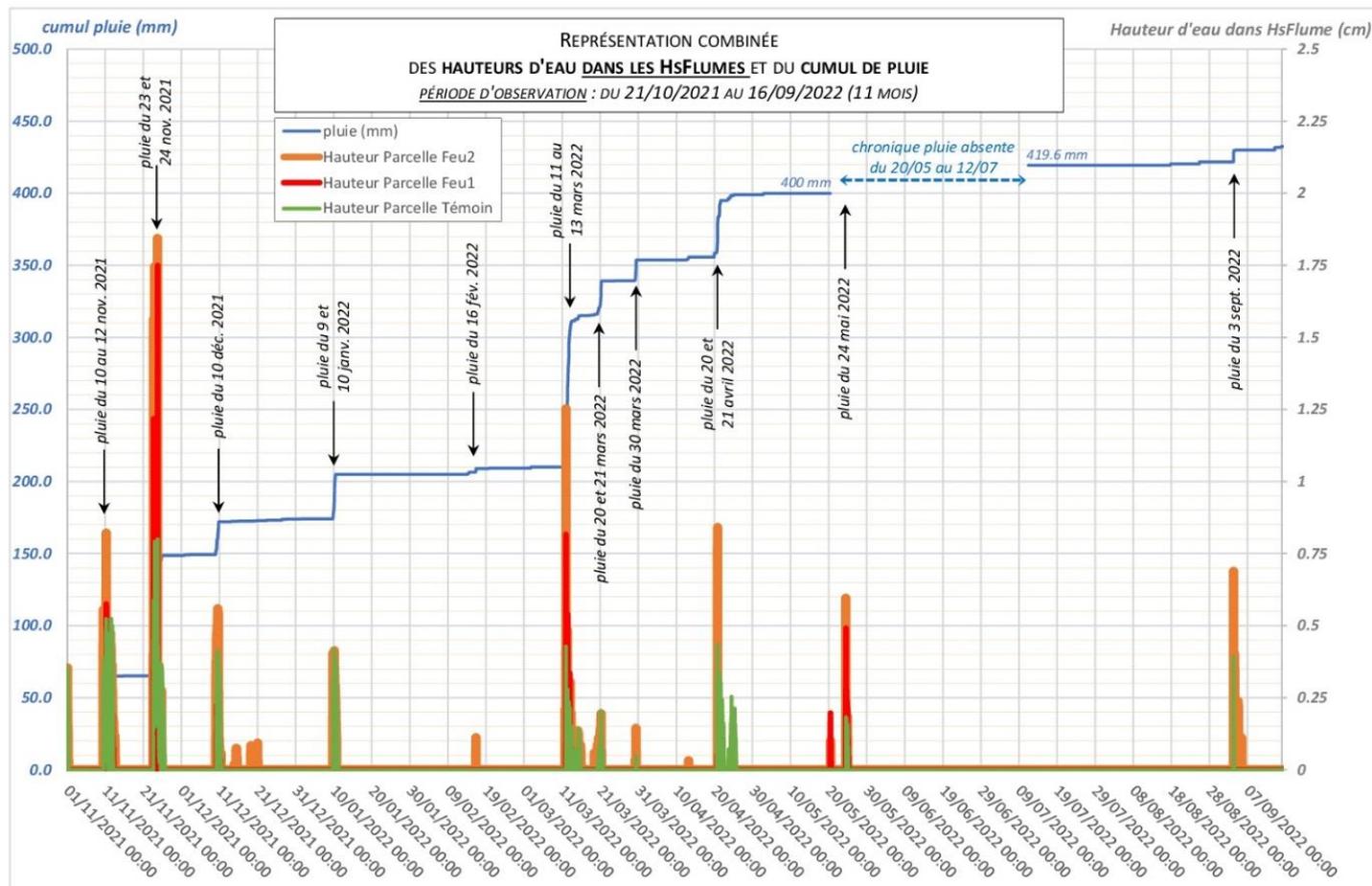


Figure 45 : hauteurs d'eau traitées qui correspondent aux hauteurs réelles dans les Hs-Flume. On rappelle qu'en dessous d'une hauteur de 6 mm la courbe de tarage ne garantit pas la valeur calculée du débit correspondant.

Les hauteurs d'eau réelles dans les Hs-Flume sont présentées sur la *Figure 45*. Les pluies ayant générées les réponses hydrologiques les plus remarquables sont mentionnées sur la courbe du cumul de pluie.

Sur ce graphique, on peut faire les observations suivantes :

- les réponses hydrologiques des parcelles sont d'autant plus importantes que les épisodes pluvieux sont forts ;
- les parcelles incendiées réagissent plus souvent que la parcelle Témoin ;
- la parcelle Feu2 produit une réponse hydrologique plus forte que celle de la parcelle Feu1 ;
- la parcelle Feu2 est plus pentue que la parcelle Feu1. Il y a une cohérence sur le niveau d'intensité des réponses hydrologiques des différentes parcelles : la parcelle Feu2 réagit plus fortement que la parcelle Feu1 qui elle-même réagit plus fortement que la parcelle Témoin.

3.2.3 DEBITS MESURES

Par sa conception, le Hs-Flume 0.8 Ft établit une courbe de tarage sur la gamme [0,61 cm – 24,08 cm] de hauteur d'eau. En dessous de la valeur de 0,61 cm, la courbe de tarage ne donne pas de correspondance Hauteur-Débit.

A partir des données de la *Figure 45*, on filtre les valeurs des hauteurs d'eau réelles en ne conservant que celles dont la valeur est supérieure à 0,61 cm. Avec ce nouveau jeu de données, on établit le jeu de données des débits ruisselés (*Figure 46*).

Ce graphique permet de faire les observations suivantes :

- on compte 5 épisodes pluvieux pendant lesquels un écoulement est observé sur au moins 1 parcelle :
 - pluie du 10 au 12 novembre 2021 (intensité max. = 20 mm/h)
 - pluie du 23 et 24 novembre 2021 (intensité max. = 56 mm/h)
 - pluie du 11 au 13 mars 2022 (intensité max. = 34 mm/h)
 - pluie du 20 et 21 avril 2022 (intensité max. = 32 mm/h)
 - pluie du 3 septembre 2022 (intensité max. = 36 mm/h)
- la parcelle Feu2 (parcelle incendiée la plus pentue) réagit très vite et le plus fortement.
- la parcelle Feu1 (parcelle incendiée moins pentue) réagit moins rapidement et plus modérément que la parcelle Feu 2.
- la parcelle Témoin réagit peu.

Les réponses hydrologiques de ces petites parcelles expérimentales **sont davantage liées à l'intensité pluvieuse** qu'au cumul total de l'épisode pluvieux.

La parcelle Feu2 présente une réponse hydrologique dès que l'intensité pluvieuse est supérieure à 20 mm/h. Les premières réponses hydrologiques (Feu2) se produisent à partir d'une intensité pluvieuse de 20 mm/h.

Les parcelles Feu1 et Témoin ne semblent réagir qu'à partir d'intensités pluvieuses plus fortes (> 34 mm/h).

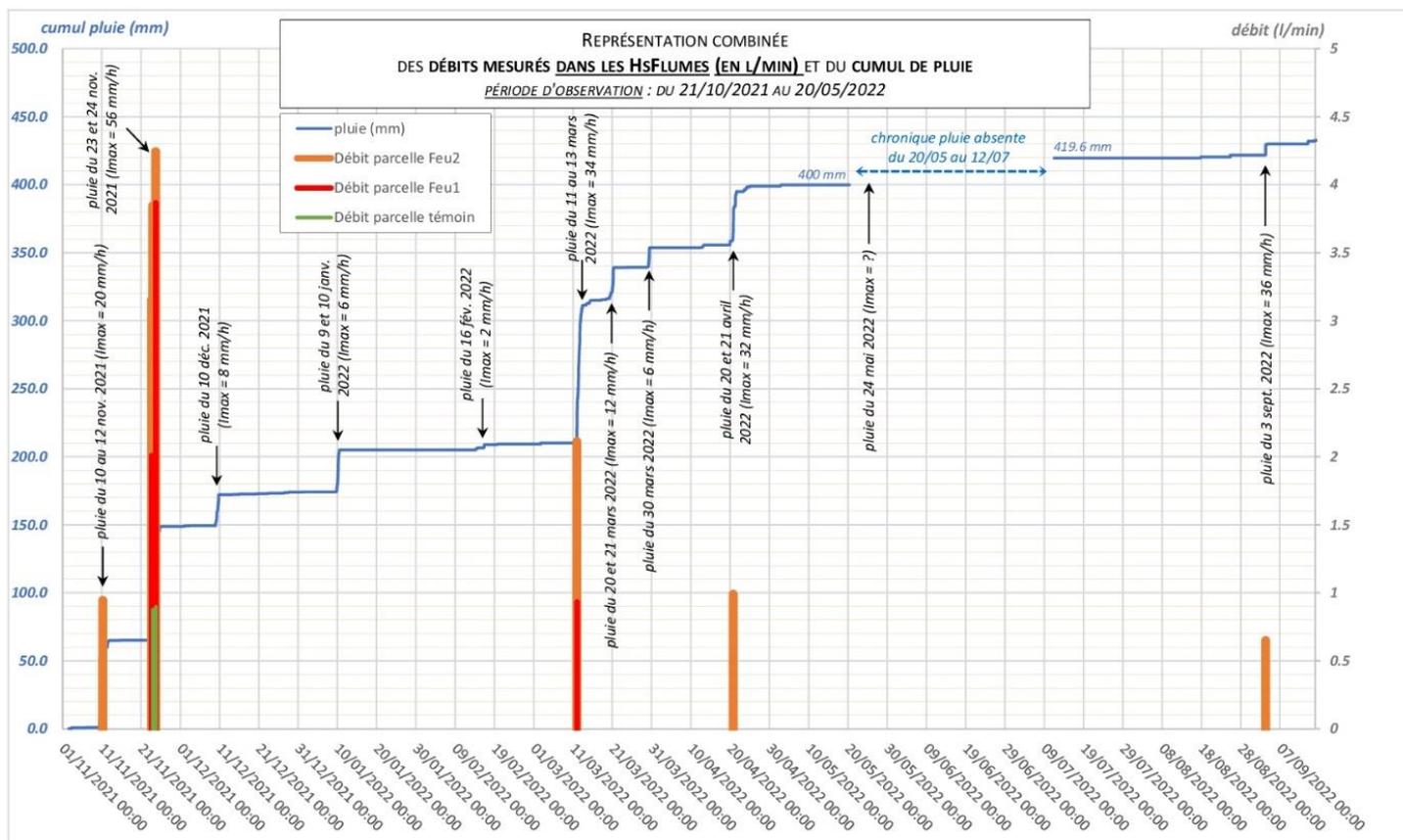


Figure 46 : débits mesurés sur les 3 parcelles d'érosion en comparaison avec le cumul et les intensités horaires des épisodes pluvieux. En vert les résultats de la parcelle Témoin ; en rouge les résultats de la parcelle Feu1, en orange les résultats de la parcelle Feu2.

3.2.4 FOCUS SUR L'ÉPISODE PLUVIEUX DE NOVEMBRE 2021

L'analyse détaillée de l'épisode pluvieux du 23 et 24 novembre 2021 permet de mieux comprendre les seuils des intensités de pluie qui déclenchent les réponses hydrologiques des parcelles (Figure 47).

Avec une intensité maximale de 56 mm/h, la pluie des 23 et 24 novembre 2021 est l'épisode pluvieux le plus intense enregistré pendant l'expérimentation. En regardant dans le détail cet épisode pluvieux, on constate qu'il est composé de 3 pics de pluie, ayant généré 3 pointes de débits ruisselés.

- ❖ Le premier pic de pluie a eu lieu le 23/11/21 à 16H50, avec une intensité de **30 mm/h** :
 - seules les parcelles incendiées génèrent des ruissellements mesurables ;
 - la parcelle Feu2 réagit plus fortement (3,2 l/min) que la parcelle Feu1 (2 l/min).
- ❖ Le deuxième pic de pluie a eu lieu le 24/11/21 à 00H02, avec une intensité de **40 mm/h** :
 - toutes les parcelles produisent une réponse hydrologique ;
 - la parcelle Feu2 réagit le plus fortement (3,8 l/min), puis la parcelle Feu1 (1,6 l/min), puis la parcelle Témoin (0,9 l/min).
- ❖ Le troisième pic de pluie a eu lieu le 24/11/21 à 18H10, avec une intensité de **56 mm/h** :
 - toutes les parcelles produisent une réponse hydrologique ;

- la parcelle Feu2 réagit le plus fortement (4,3 l/min), puis la parcelle Feu1 (3,9 l/min), puis la parcelle Témoin (0,9 l/min).

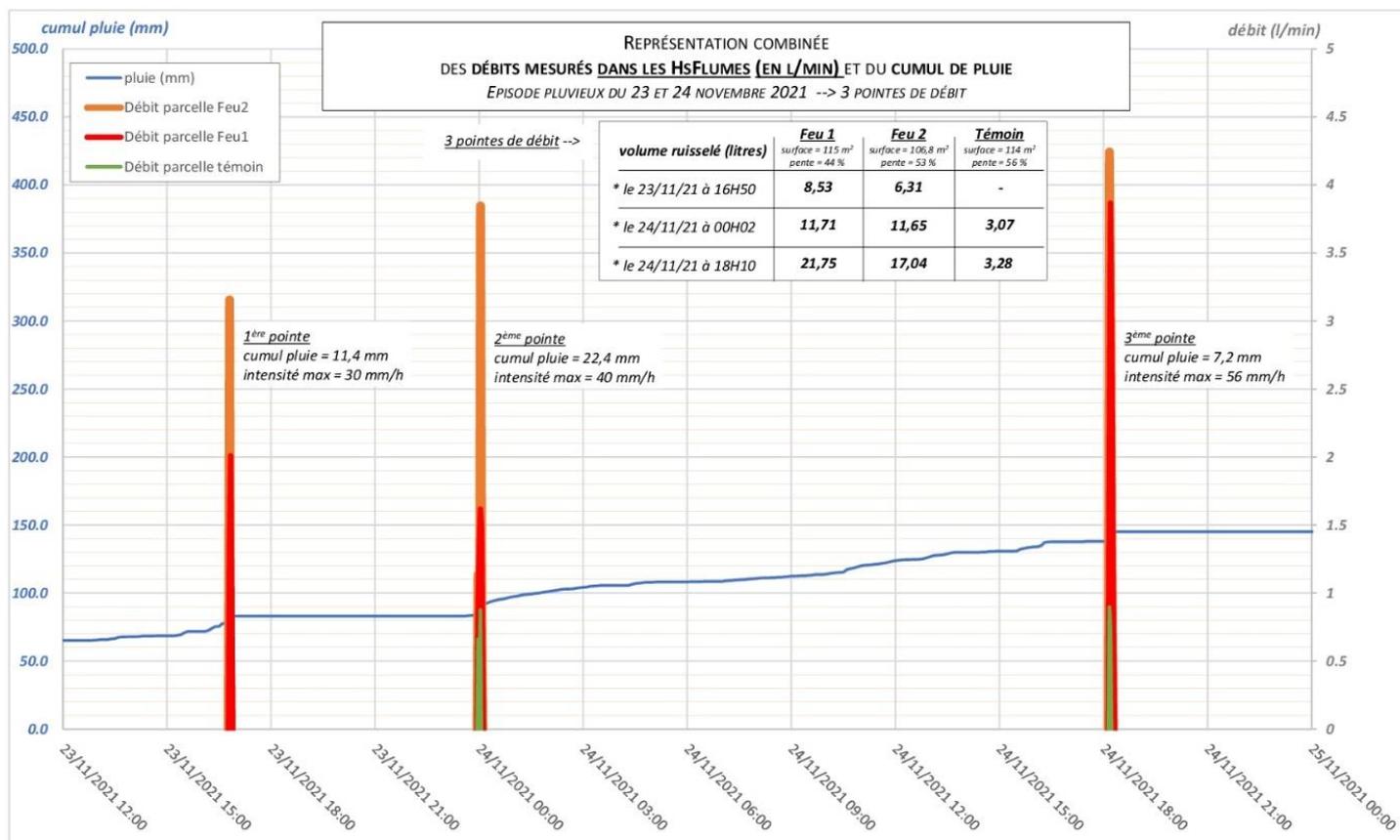


Figure 47: débits mesurés pendant la pluie du 23 et 24 novembre 2021. Plusieurs pics de crue sont mesurés. Pour chacun d'eux il est possible de caractériser le fonctionnement des parcelles.

On constate que **l'intensité horaire (en mm/h) est le principal facteur de forçage** des réponses hydrologiques. Le cumul de pluie a peu d'effet sur l'importance du débit ruisselé ; par exemple, avec un cumul de 22,4 mm et une intensité de 40 mm/h, la réponse hydrologique du 2^{ème} pic de pluie est moins forte que celle du 3^{ème} pic de pluie qui possède un faible cumul (7,2 mm) mais une intensité horaire plus forte (56 mm/h).

En ce qui concerne les volumes ruisselés sur chacune des parcelles, l'épisode pluvieux de fin novembre 2021 a mis en évidence les conséquences de l'incendie (Tableau 6) : les volumes produits par la parcelle Témoin sont 3 à 6 fois inférieurs à ceux produits sur les parcelles incendiées.

Tableau 6: volumes ruisselés pendant l'épisode pluvieux du 23 et 24 novembre 2021

volume ruisselé (litres)	Feu 1 surface = 115 m ² pente = 44 %	Feu 2 surface = 106,8 m ² pente = 53 %	Témoin surface = 114 m ² pente = 56 %
* le 23/11/21 à 16H50	8,53	6,31	-
* le 24/11/21 à 00H02	11,71	11,65	3,07
* le 24/11/21 à 18H10	21,75	17,04	3,28

La parcelle Feu1 produit un volume plus important que la parcelle Feu2, malgré un débit moindre. Cela peut s'expliquer par une pente de la parcelle Feu1 qui est plus faible que celle de la parcelle Feu2, et par conséquent, l'hydrogramme est davantage étalé dans le temps.

Le Tableau 7 résume les observations faites pendant les deux pics de la pluie du 24 novembre 2021. En prenant la parcelle Témoin comme référence, on en déduit que :

- pour la **parcelle Feu1**
 - le débit est 1,6 à 2,5 fois plus fort
 - le volume est 3,8 à 6,6 fois plus important
- pour la **parcelle Feu2**
 - le débit est 4,7 à 5,8 fois plus fort
 - le volume est 3,8 à 5,2 fois plus important

Ces résultats sont issus de seulement deux pics de pluie et ne sont pas généralisable. En revanche ils mettent en évidence des tendances qui démontrent que les incendies ont un effet important sur la modification de l'hydrologie au moins pendant 4 mois après un feu.

Tableau 7: évaluation de l'augmentation des débits et des volumes sur les parcelles incendiées par rapport à la parcelle Témoin

<u>pluie du 24/11 à 00h02</u>	débit max. mesuré (l/min)	coef. multiplicateur	volume ruisselé (litres)	coef. multiplicateur
parcelle Témoin (végétalisée) pente = 56 %	0,66	référence	3,07	référence
parcelle Feu 1 pente = 44 %	1,62	x 2,5	11,71	x 3,8
parcelle Feu 2 pente = 53 %	3,85	x 5,8	11,65	x 3,8
<u>pluie du 24/11 à 18h10</u>	débit max. mesuré (l/min)	coef. multiplicateur	volume ruisselé (litres)	coef. multiplicateur
parcelle Témoin (végétalisée) pente = 56 %	0,90	référence	3,28	référence
parcelle Feu 1 pente = 44 %	1,42	x 1,6	21,75	x 6,6
parcelle Feu 2 pente = 53 %	4,24	x 4,7	17,04	x 5,2

3.2.5 RESULTATS SUR UN AUTRE INCENDIE A PROXIMITE

Pendant la durée du projet, le service RTM a étudié un autre incendie qui s'est produit sur les communes d'OPOUL-PERILLOS et de SALSES-LE-CHATEAU (nord-est du département des PYRENEES-ORIENTALES). Cet incendie de 1 000 ha brûlé un massif forestier (pins, eucalyptus) et des formations de type garrigue arbustives. La nature géologique est marno-calcaire, avec des secteurs où l'on retrouve des sols squelettiques.

Afin de quantifier l'augmentation du ruissellement engendré par le passage du feu, nous avons réalisé des mesures de percolation d'eau dans le sol à différents endroits, et selon plusieurs configurations de dégradation du couvert végétal. L'objectif de ce type de mesure est de comparer, selon la couverture du sol, la capacité d'infiltration en surface, et donc d'en déduire le potentiel de ruissellement.

La méthodologie employée n'est pas normée. Elle est inspirée des essais géotechniques de perméabilité de type Nasberg en forage. La grande différence est que dans notre cas, nous essayons de quantifier la perméabilité à la surface du sol, sans réalisation de forage. La limite de l'expérimentation repose essentiellement sur les difficultés de ne pas avoir de fuites d'eau au niveau de l'interface entre le gabarit de mesure et le sol. Compte tenu des sols graveleux rencontrés, il est assez difficile de ficher idéalement le cône de mesure dans le sol. Mais compte tenu que cette difficulté est apparue de manière similaire pour tous les essais, même si les valeurs absolues de percolations sont erronées, nous pouvons considérer que les **comparaisons en relatif sont pertinentes**.

Ces mesures de percolations ont été réalisées sur les endroits suivants :

- **site 1** : peuplement de pins à proximité de la citerne DFCI située à l'entrée de la forêt domaniale depuis la piste de la crête Vilaplana
- **site 2** : peuplement de pins en forêt domaniale au lieu-dit les Fontanilles
- **site 3** : peuplements de pins et d'eucalyptus sur le Serrat Negre, à proximité du camping du Bois de Pins.

Sur chacun de ces sites, les mesures de percolation (*Figure 48*) ont permis que mesurer le taux d'infiltration d'eau dans le sol selon les configurations suivantes :

- sols en **forêt non brûlée** : présence d'un couvert forestier et d'une litière végétale ;
- sols en **forêt brûlée** avec un **Indice de Sévérité Faible** : le feu a parcouru l'étage bas de la végétation, il n'y a plus de litière et les pins restent vert sur le tiers supérieur. Le sol est parsemé d'aiguilles de pins.
- sols en **forêt brûlée** avec un **Indice de Sévérité Fort** : le feu a brûlé entièrement la litière et les houppiers.



Figure 48 : mesures de percolation selon plusieurs configurations :

- (a) : sols en **Forêt Non Brulée**
- (b) : sols en **forêt brûlée** avec un **Indice de Sévérité Faible**
- (c) : sols en **forêt brûlée** avec un **Indice de Sévérité Fort**

Figure 49 : mise en œuvre des mesures de percolation. Le cône métallique est fiché dans le sol, puis rempli d'eau. Une sonde automatique mesure l'abaissement du niveau d'eau dans le cône.



Chaque mesure de percolation réalisée est assez simple et nécessite peu de matériel (Figure 49) :

- un gabarit métallique d'une capacité suffisante à ficher dans le sol (cylindre ou cône) ;
- une réserve d'eau d'environ 10 litres ;
- un niveau pour contrôler l'horizontalité ;
- une sonde automatique de mesure du niveau d'eau ;
- un téléphone pour télécharger les données enregistrées par la sonde.

Les résultats des mesures de percolation sont présentés sur la Figure 50 :

- les essais sur le sol où l'indice de sévérité du feu est Fort apparaissent en courbes de couleur noire ;
- l'essai sur le sol où l'indice de sévérité du feu est Faible apparait en courbe de couleur orange ;
- les essais sur le sol où la végétation n'a pas brûlée apparaissent en courbes de couleur verte.

On constate que les percolations dans les sols non brûlé ou peu soumis au feu (indice de sévérité Faible) sont plus importantes. Cela signifie donc qu'inversement, **le taux de ruissellement est d'autant plus fort que l'indice de sévérité du feu est élevé.**

Les résultats des mesures de percolation indiquent un ratio de 1 à 5 entre un sol non brûlé et un sol fortement brûlé.

Cela signifie que le taux de ruissellement serait 5 fois supérieur sur les sols fortement brûlés par rapport aux sols non incendiés.

On gardera à l'esprit que ces mesures comportent des approximations de mise en œuvre qui nécessitent d'être prudent avec ces valeurs (difficulté de parfaitement confiner la surface d'infiltration, des pertes latérales sont observées). Ces résultats sont également fortement dépendant de l'échelle d'analyse : à l'échelle très ponctuelle des mesures de percolation, les valeurs peuvent être très fortes en comparaison à l'échelle d'un versant sur lequel les valeurs fortes sont abaissées et moyennées par effet d'intégration à grande échelle.

Les expérimentations réalisées à la suite du feu d'OPOUL (mesures de percolation en surface), malgré des incertitudes de mise en œuvre, donnent des ratios de l'ordre de 1 à 5 en termes d'augmentation du ruissellement (pour une pluie équivalente forte) entre un sol végétalisé et un sol incendié avec un indice de sévérité du feu fort.

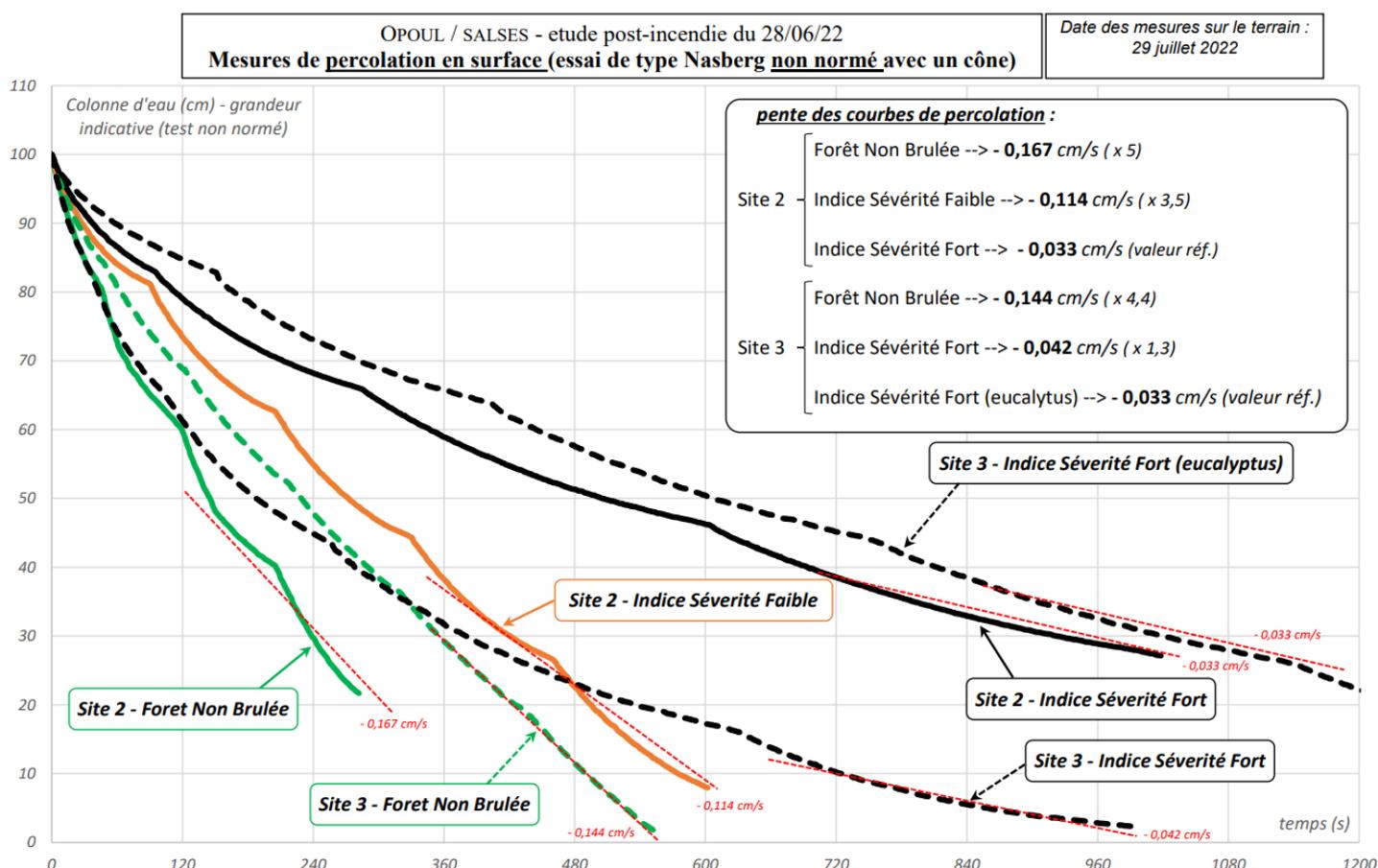


Figure 50 : résultats des mesures de percolation réalisées à la suite de l'incendie d'OPOUL.

3.2.6 CONCLUSIONS SUR L'HYDROLOGIE

En ce qui concerne les bilans hydrologiques, on observe que les parcelles incendiées produisent davantage de volume ruisselé avec un débit plus fort que la parcelle végétalisée qui sert de référence.

Les valeurs de débit sont multipliées dans une gamme de 1,6 à 5,8 fois par rapport au débit mesuré sur la parcelle de référence.

En ce qui concerne le volume ruisselé, les valeurs sont multipliées dans une gamme de 3,8 à 6,6 fois par rapport au volume produit par la parcelle de référence.

Par ailleurs, cette expérimentation met en évidence que le ruissellement est beaucoup plus sensible à l'intensité de la pluie plutôt qu'à son cumul.

La parcelle végétalisée commence à ruisseler pour intensité pluvieuse supérieure à 40 mm/h.

A contrario, les parcelles incendiées commencent à ruisseler dès que l'intensité pluvieuse dépasse le seuil de 20 mm/h.

Ces résultats démontrent que le ruissellement sur sols incendiés se produit deux fois plus facilement que sur sol végétalisé. Par conséquent, dans un contexte de végétation méditerranéenne de type maquis arbustif sur sols schisteux, et pour des pluies faibles et modérées, on a un rapport de 1 à 2 en termes d'intensité de pluie pour générer un ruissellement entre un sol incendié et un sol non incendié.

L'expérimentation du projet MONTCLIMA sur CERBERE, confortée par les investigations menées à la suite de l'incendie d'OPOUL-PERILLOS et de SALSES-LE-CHATEAU, donnent des résultats établis sur des mesures ponctuelles limités dans l'espace et dans le temps. Il est donc hasardeux d'extrapoler ces résultats non consolidés à tout un bassin versant. En effet, une approche plus globale au niveau d'un bassin versant a pour effet d'atténuer les extrêmes des mesures ponctuelles. Nous pensons que la multiplication par 5 du coefficient de ruissellement n'a pas de réalité à grande échelle. D'ailleurs, la synthèse bibliographique indique que les valeurs sont plus proche d'un rapport de 1 à 2 pour la valeur des coefficients de ruissellement entre un sol non brûlé et un sol brûlé pour les épisodes pluvieux tout en plafonnant le coefficient de ruissellement qui ne peut pas être supérieur à 0,8.

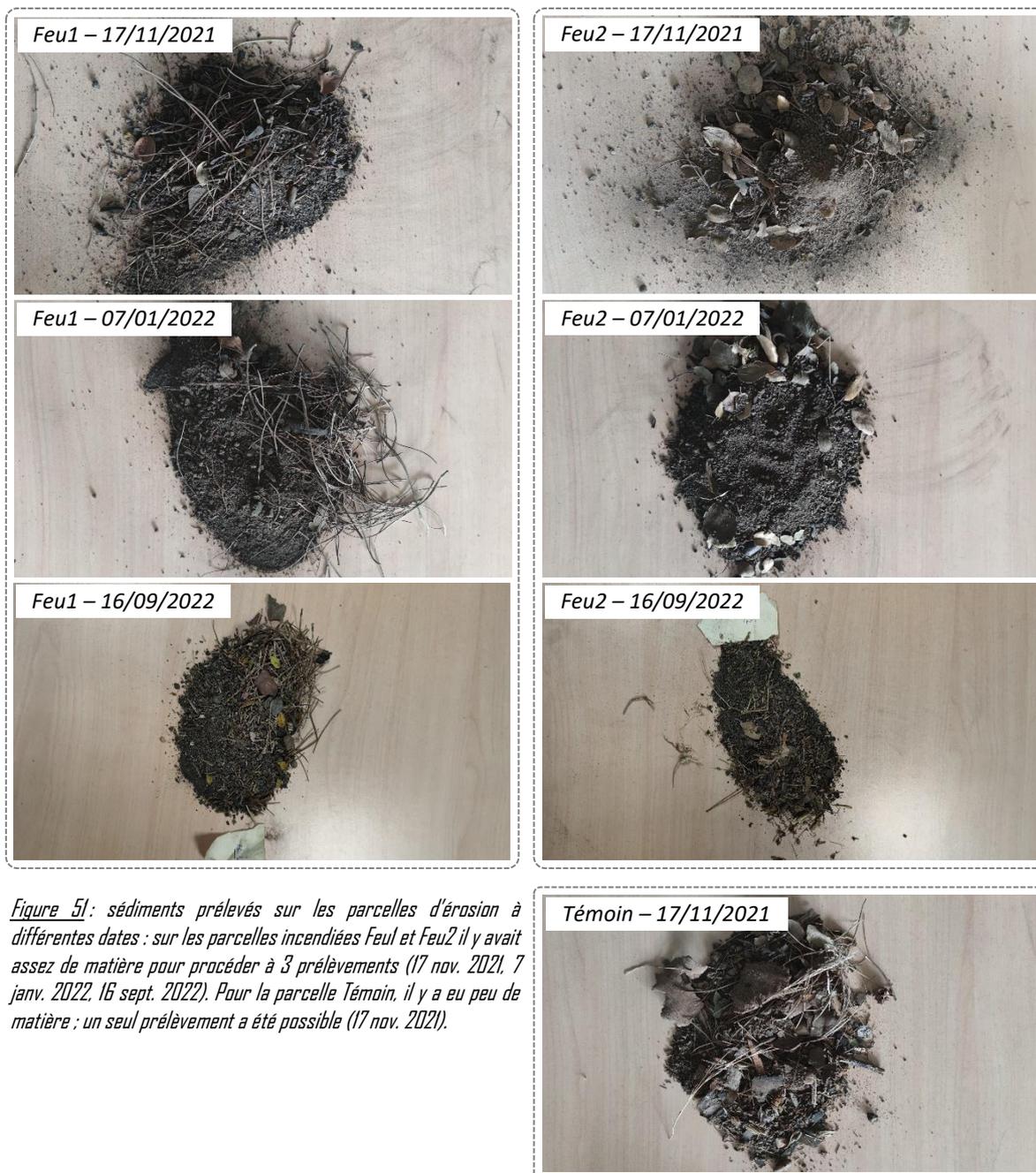
3.3 AGGRAVATION DE L'ÉROSION

3.3.1 RESULTATS DES MESURES EXPERIMENTALES

Les produits d'érosion sont prélevés périodiquement pendant les visites de maintenance dans les bacs de sédimentation de chaque parcelle. Ces sédiments sont ensuite séchés naturellement, puis trier de manière en enlever les débris végétaux (aiguilles, feuilles, morceaux d'écorce) pour être pesés.

Pendant la durée de l'expérimentation, les sédiments ont été prélevés 3 fois : le 17 novembre 2021, le 7 janvier 2022 et le 16 septembre 2022. Lors des autres visites de maintenance, les quantités déposées n'étaient pas suffisant pour être prélevées. Les matières prélevées sont composées de sables, suie, cailloux et débris végétaux, comme illustrées sur la *Figure 51*.

Sur la parcelle témoin, on retrouve majoritaire des débris végétaux et des sables très fins. Sur la parcelle Feu 1 les dépôts sont composés de sables et cailloux, tandis que sur la parcelle Feu 2 on retrouve majoritairement des cailloux.



Le Tableau 8 présente les résultats de prélèvements dans les bacs de sédimentation. Une partie des sédiments ont été transportés par érosion éolienne, mais la plupart l'ont été par érosion hydraulique après les épisodes pluvieux significatifs.

Etant donnée la régularité des visites de maintenance entre les épisodes de pluie, il est possible de déterminer les contextes pluvieux qui ont produit les masses de sédiments déposés :

- prélèvement du 17/11/2021 → pluie génératrice : 10 au 12 nov. 2021 (Int. max. 20 mm/h)
- prélèvement du 07/01/2022 → pluie génératrice : 23 et 24 nov. 2021 (Int. max. 56 mm/h)
- prélèvement du 16/09/2022 → pluie génératrice : 3 sept. 2022 (Int. max. 36 mm/h)

Assez paradoxalement, à la suite de l'épisode pluvieux ayant généré une réponse hydrologique significative (pluie du 11 au 13 mars 2022), les bacs de sédimentation étaient plutôt propres et dépourvus de matériaux. Cela laisse à penser que les masses prélevées sont minorées par rapport à la réalité des processus érosifs.

Tableau 8 : mesure de l'érosion pendant la durée de l'expérimentation : masses de sédiments prélevés dans les bacs de sédimentation de chacune des parcelles

	date de relevés des sédiments			bilan du 21/10/2021 au 16/09/2022	
	17/11/2021 masse en grammes	07/01/2022 masse en grammes	16/09/2022 masse en grammes		
	cumul pluviométrique antérieur = 65 mm nombre d'épisodes pluvieux = 1 intensité maximal de la pluie = 20 mm/h	cumul pluviométrique antérieur = 109 mm nombre d'épisodes pluvieux = 2 intensité maximal de la pluie = 56 mm/h	cumul pluviométrique antérieur = 33 mm nombre d'épisodes pluvieux = 2 intensité maximal de la pluie = 36 mm/h	Cumul (Kg) sur la parcelle	érosion équivalente t/ha/an
parcelle Feu 1	170	440	108	0.718	0.069
type de dépôts	nombreux sables et cailloux beaucoup de suie et débris de végétaux	nombreux sables et cailloux beaucoup de suie et débris de végétaux	nombreux sables et cailloux débris de végétaux		
parcelle Feu 2	315	540	85	0.94	0.097
type de dépôts	nombreux sables et cailloux beaucoup de suie et débris de végétaux	nombreux sables, forte proportion de cailloux beaucoup de suie et débris de végétaux	nombreux sables et cailloux débris de végétaux		
parcelle Témoin	pas de sédiments	75	pas de sédiments	0.075	0.007
type de dépôts	-	sables très fins et suie beaucoup de débris de végétaux	-		

Compte tenu de la pluviométrie déficitaire sur la saison étudiée et du faible nombre d'épisodes pluvieux, les processus d'érosion ont été modérés. Le bac de sédimentation de la parcelle Témoin n'a été prélevé qu'une seule fois. A contrario, les bacs de sédimentation des parcelles Feu1 et Feu2 ont pu être prélevés trois fois. On en déduit que l'érosion est plus fréquente dans le temps sur les parcelles incendiées.

Par ailleurs, les masses des sédiments prélevés sont bien plus fortes sur les parcelles incendiées que sur la parcelle Témoin. Lors de la visite du 7 janv. 2021 pendant laquelle il a été possible de procéder à des prélèvements sur toutes les parcelles, on a environ **6 et 7 fois plus** d'érosion, respectivement sur les parcelles Feu1 et sur Feu2, par rapport à la parcelle Témoin.

Les taux équivalent d'érosion sont très variables, entre la parcelle témoin végétalisée (7 Kg/ha), la parcelle Feu 1 (69 Kg/ha) et la parcelle Feu 2 (97 Kg/ha).

Si l'on considère le taux d'érosion comme une référence, on observe dans le *Tableau 9* que le potentiel érosif est **10 fois plus élevé sur la parcelle Feu 1**, et **14 fois plus élevé sur la parcelle Feu 2**. Ces valeurs ne traduisent pas des grandeurs en valeur absolue ; elles doivent être considérées comme des **tendances comparatives** entre les parcelles pour ce projet.

<i>Tableau 9 : bilan sédimentaire sur la période du 21/10/2021 au 16/09/2022</i>	masse sédiments mesuré (kg)	Erosion équivalente (t/ha/an)	coef. multiplicateur
parcelle végétalisée pente = 56 %	0,075	0,007	référence
parcelle Feu 1 pente = 44 %	0,718	0,069	x 10
parcelle Feu 2 pente = 53 %	0,940	0,097	x 14

3.3.2 QUALIFICATION DE L'ÉROSION : DYNAMIQUE NATURELLE DE RECOLONISATION DE LA VÉGÉTATION

L'impact d'un incendie sur le potentiel d'aggravation de l'érosion des sols est immédiat après le passage du feu. Ce potentiel reste élevé tant que la couverture végétale reste insuffisante pour retrouver sa capacité à fixer localement le terrain et offrir une protection contre les impacts des gouttes de pluie.

La bibliographie sur cette thématique de résilience du milieu du point de vue temporel indique qu'il est communément admis que la période critique vis-à-vis de la sensibilité du sol à l'érosion avant un retour à une situation « normale » est comprise en moyenne **entre 1 et 5 ans**. Au-delà de ce délai, la végétation rejoue son rôle protecteur d'avant l'incendie. Cette gamme temporelle est très variable selon l'intensité du feu, la géologie, la pluviométrie (météorologie plus généralement), la végétation présente, etc.

Dans le cas précis de l'incendie de CERBERE, les visites de maintenance ont permis d'obtenir un visuel très régulier sur le dispositif. En compilant les éléments photographiques depuis l'incendie, jusqu'en septembre 2022, on peut évaluer la dynamique naturelle de recolonisation de la végétation et avoir une idée de la temporalité de la période critique vis-à-vis de l'érosion des sols. Cette analyse comparative est illustrée sur les planches photographiques de la *Figure 52* à la *Figure 56*.

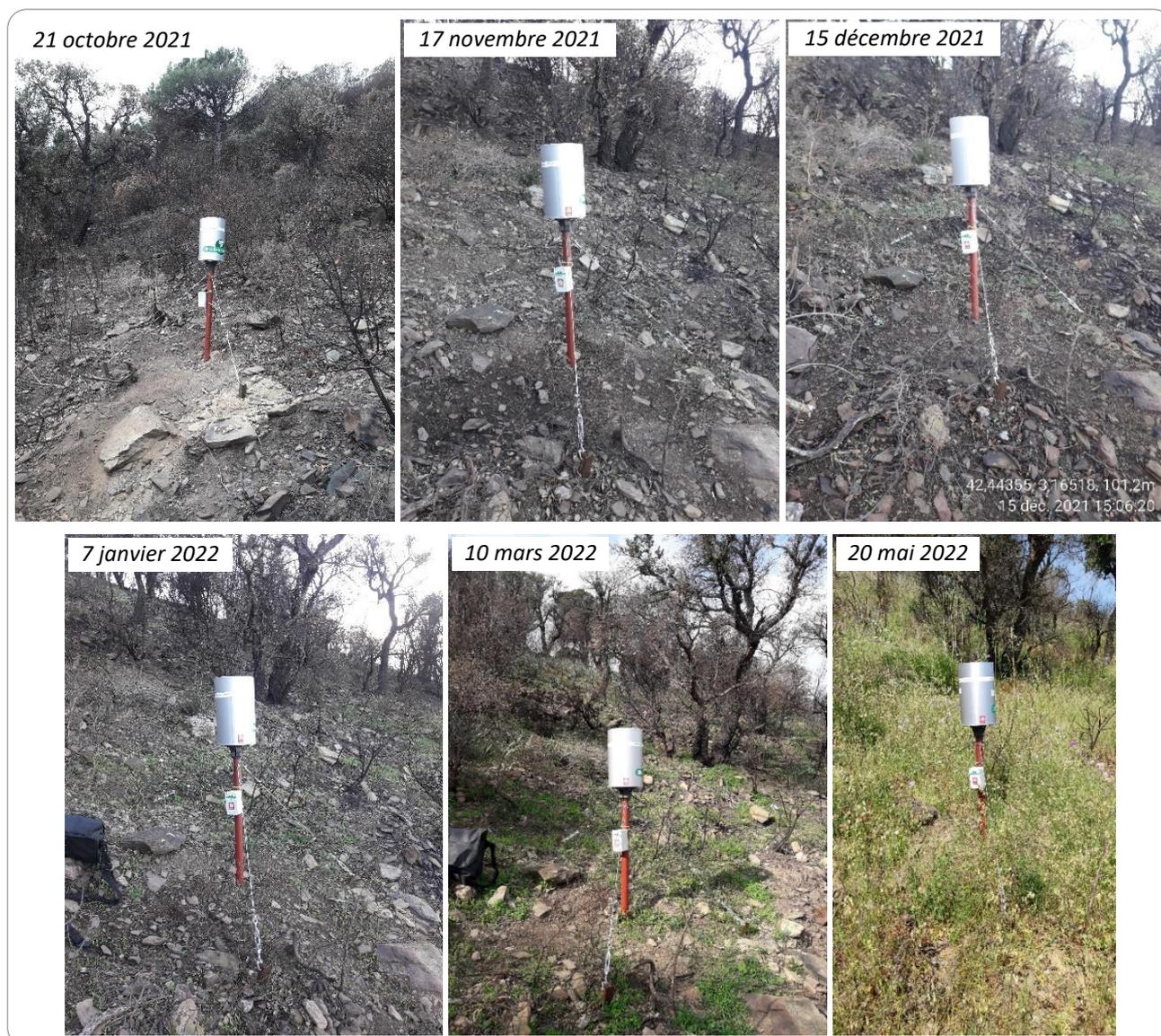


Figure 52 : dynamique de la re-végétalisation naturelle autour du pluviomètre entre octobre 2021 et mai 2022

Figure 53 : dynamique de la re-végétalisation naturelle sur la parcelle Feul entre octobre 2021 et septembre 2022



Figure 54 : dynamique de la re-végétalisation naturelle sur la parcelle Feu2 entre novembre 2021 et septembre 2022





Figure 55 : dynamique de la re-végétalisation naturelle sur la parcelle Témoir entre octobre 2021 et septembre 2022

Figure 56 : dynamique de la re-végétalisation naturelle sur la crête frontalière entre août 2021 et mai 2022

st. météo existante - 27 août 2021



st. météo existante - 20 mai 2022



Ces planches photographiques permettent de faire les observations suivantes :

- ❖ aux abords du pluviomètre (Figure 52) : le site a été impacté par un indice de sévérité Moyen.
 - le sol reste dépourvu de végétation jusqu'à fin novembre 2021 (incendie + 4 mois) ;
 - en décembre 2021, on commence à apercevoir des jeunes pousses d'herbacées de manière diffuse ;
 - en janvier 2022, ce reverdissement herbacé s'étend et couvre environ 30 % de la surface ;
 - au mois de mars 2022 (incendie + 8 mois) la strate herbacée s'étend encore davantage pour couvrir 50 % du sol ;
 - en mai 2022 (incendie + 10 mois) la couverture végétale est très bonne et couvre plus de 90 % du sol avec une épaisseur de végétation significative.
- ❖ sur la parcelle Feu1 (Figure 53) : le site a été impacté par un indice de sévérité Fort.
 - le sol reste dépourvu de végétation jusqu'à fin novembre 2021 (incendie + 4 mois) ;
 - en janvier 2021, le sol reste nu dans l'ensemble et on observe de très timides pousses d'herbacées ;
 - début mars 2022, la végétation herbacée s'étend mais couvre à peine 20 % de la surface du sol ;
 - fin mars 2022, un tapis végétatif se met en place et couvre 40 % du sol ;
 - en mai 2022 (incendie + 10 mois), la couverture végétale atteint un ratio d'environ 70 % ;
 - en septembre 2022, la couverture végétale est toujours d'environ 70 % de la surface du sol et son épaisseur devient significative.

- ❖ sur la parcelle Feu2 (Figure 54): le site a été impacté par un indice de sévérité Fort.
 - le sol reste dépourvue de végétation jusqu'à fin novembre 2021 (incendie + 4 mois) ;
 - en janvier 2021, le sol reste nu dans l'ensemble et on observe de très timides pousses d'herbacées ;
 - début mars 2022, la végétation herbacée s'étend mais couvre à peine 20 % de la surface du sol ;
 - fin mars 2022, un tapis végétatif se met en place et couvre plus de 50 % du sol ;
 - en mai 2022 (incendie + 10 mois), la couverture végétale atteint une proportion conséquente d'environ 80 % ;
 - en septembre 2022, la couverture végétale est toujours d'environ 80 % de la surface du sol et son épaisseur devient significative.
- ❖ sur la parcelle Témoin (Figure 55): le site n'a pas été impacté l'incendie.
 - la végétation est sèche jusqu'en mars 2022. La couverture végétale est de l'ordre de 90 % ;
 - en mars et mai 2022, la végétation couvre parfaitement toute la surface du sol (100 %) et son épaisseur est importante ;
 - en septembre 2022, la strate herbacée jaunit mais sa couverture est toujours optimale (90 %).
- ❖ sur la crête frontalière (Figure 56): le site a été impacté par un indice de sévérité Moyen.
 - en août 2021 (incendie + 1 mois), toute la végétation rase a été brûlée ;
 - en mai 2022 (incendie + 10 mois), la végétation rase couvre plus de 90% de la surface du sol avec une épaisseur importante.

Ces observations sont résumées sur la [Figure 57](#) qui présente l'allure, pour chaque site observé, de l'évolution de la couverture végétale au sol. L'estimation du pourcentage de couverture est évaluée visuellement.

De ces observations, on en déduit que la **dynamique naturelle de recolonisation de la végétation est globalement forte puisqu'au bout de 10 mois après l'incendie, la couverture au sol est satisfaisante** (comprise en 70 % et 90 % selon les sites).

Sur la parcelle Témoin, la couverture végétale est très bonne et constante dans le temps, hormis au printemps où elle atteint un maximum.

Sur les parcelles incendiées Feu1 et Feu2, la dynamique naturelle de recolonisation de la végétation suit la même évolution temporelle.

Aux abords du pluviomètre, qui se situe un peu plus à l'abri des arbres environnants, et moins durement impacté par le feu (indice de sévérité moyen), la reprise de la végétation a été plus rapide.

Ces résultats de l'analyse comparative de la dynamique naturelle de recolonisation de la végétation sont cohérents avec les résultats des prélèvements de sédiments dans les bacs : plus la couverture végétale au sol est importante, plus les volumes de sédiments prélevés sont faibles.

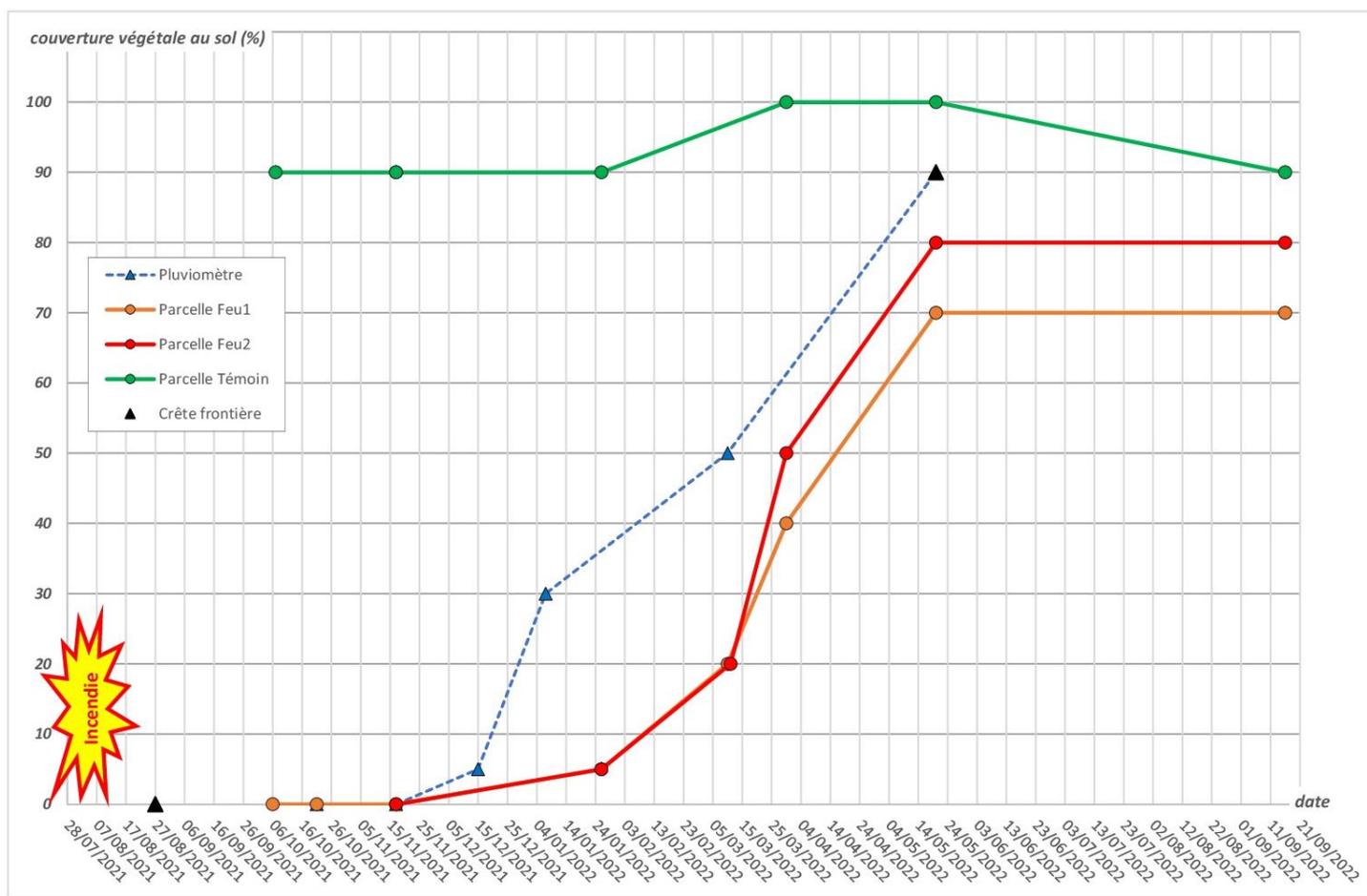


Figure 57 : dynamique naturelle de recolonisation de la végétation après l'incendie sur les parcelles d'érosion et à proximité du pluviomètre

3.4 RESERVES SUR L'INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats hydro-sédimentaires de l'expérimentation des parcelles d'érosion peuvent paraître précis, mais il faut les contextualiser et les prendre avec certaines réserves, notamment du fait que :

- la taille très restreinte des parcelles (100 m² environ) conduit à mesurer des grandeurs non moyennées, contrairement à ce que l'on obtiendrait sur un bassin versant de plus grande taille. Les valeurs obtenues à cette petite échelle spatiale se situent alors plutôt dans la marge haute des valeurs réelles ;
- la faible durée de la période d'observation ne permet pas de moyenner les valeurs dans le temps. Il suffit d'avoir une pluviométrie soit anormalement trop faible, soit anormalement trop forte sur la période d'observation pour fausser les valeurs vraisemblables que l'on pourrait obtenir sur une période d'observation plus longue. Dans le cas présent, la pluviométrie a été anormalement faible ;
- il existe des incertitudes sur la part de l'érosion naturelle à mesurer et celle de l'érosion anthropique générée lors de la mise en place des équipements ;
- il existe des incertitudes sur l'efficacité du confinement des parcelles à l'aide des bordures ;
- il existe des approximations sur le calage des zéros des sondes de mesure du niveau d'eau.

4 LES ENSEIGNEMENTS ET LES SUITES DU PROJET

Le projet MONTCLIMA a offert une réelle opportunité d'amélioration de la connaissance locale au niveau d'une partie du département des PYRENEES-ORIENTALES sur la thématique des effets induits des incendies sur les modifications hydrologiques et d'érosion des sols.

Dans sa conception, le projet a été pensé pour pouvoir être facilement et rapidement installé après la survenue d'un incendie. Tout le travail d'analyse, de dimensionnement, de mise en place, d'opérationnalisation et d'analyse des données pourra servir pour d'éventuelles expérimentations analogues sur d'autres sites.

Le projet MONTCLIMA a mis en évidence que la qualité de l'expérimentation dépend beaucoup des facteurs suivants :

- Les objectifs de l'expérimentation doivent être clairement définis avant la mise en place du dispositif ;
- Les moyens humains pour la supervision du dispositif et l'analyse des données ne doivent pas être minimisés ;
- Le choix de la localisation et du nombre de parcelles doit être en adéquation avec les moyens humains disponibles ;
- La qualité et la robustesse des équipements doivent être en cohérence avec les sollicitations extérieures (météo, risque de vandalisme, etc.) et la durée de l'expérimentation ;
- Le choix des équipements, et notamment leur précision et leur fiabilité, doit être cohérent avec le degré de précision souhaité des grandeurs à mesurer ;
- Les capacités en énergie et en stockage doivent être déterminées en fonction de la capacité à se déplacer souvent sur site pour la supervision du dispositif ;
- Concevoir un dispositif pour avoir une possibilité de travailler sur des chroniques plus longues qu'initialement (prolongation de l'expérimentation selon les financements) ;
- Anticiper la facilité et le moindre cout du démontage à la fin de l'expérimentation ;
- La richesse du jeu de données et la qualité des mesures dépend essentiellement d'un paramètre que l'on ne maîtrise pas : la survenue immédiatement après feu d'une pluviométrie assez remarquable, avec des épisodes nombreux et intenses.

Malgré une pluviométrie déficitaire et le faible nombre d'épisodes pluvieux remarquables, cette expérimentation a mis en évidence que sur des sols schisteux, avec une végétation de type maquis arbustif et sur des pentes avoisinant les 40%-50%, l'impact du feu est réel et très significatif sur l'augmentation des processus hydro sédimentaire :

- Les sols deviennent plus réactifs aux précipitations : les réponses hydrologiques des parcelles incendiées sont plus rapides et intenses ;
- Les volumes ruisselés sur les parcelles incendiées sont multipliés dans une gamme de 3,8 à 6,6 fois par rapport au volume produit par la parcelle de référence ;
- Les valeurs de débit des parcelles incendiées sont multipliées dans une gamme de 1,6 à 5,8 fois par rapport au débit mesuré sur la parcelle de référence ;

- L'érosion hydrique est fortement augmentée, dans des rapports de 1 à 14, avec des processus érosifs intenses pendant la première année après le feu ;
- La dynamique naturelle de recolonisation de la végétation est remarquable, et laisse à penser qu'au bout de 10 mois après le feu, la végétation rase commence à bien amoindrir le potentiel érosif exacerbé par l'incendie.

Les résultats obtenus donnent des tendances qui nécessiteraient d'être consolidées sur une période plus longue. Etant donné que le projet MONTCLIMA se termine à la fin de l'année 2022, il nous paraît nécessaire de construire un partenariat avec un institut de recherche ou universitaire afin de poursuivre ce travail et préciser les résultats sur une temporalité plus longue.

----- *fin du rapport* -----

AGENCE RTM PYRENEES

Service RTM des Pyrénées-Orientales et de l'Aude

8 rue des variétés

CS 50003

66026 PERPIGNAN Cedex



www.onf.fr

