

Guide d'action

Evaluation de l'aléa érosion après un incendie

Dispositif expérimental sur la commune de Cerbere
(Pyrenees-Orientales / France)





Sommaire

1. Pourquoi ce guide ?	5
1.1. L'effet du changement climatique sur l'aggravation des incendies	5
1.2. Les incendies aggravent les risques naturels	6
1.3. L'état de la connaissance actuelle et les limites sur le ruissellement et l'érosion.	9
1.3.1. <i>Modification de l'hydrologie</i>	9
1.3.2. <i>Erosion et ravinement</i>	10
2. La méthodologie proposée	13
2.1. Les objectifs	13
2.2. L'approche expérimentale	13
2.2.1. <i>Principe de l'instrumentation</i>	13
2.2.2. <i>Choix du site</i>	14
2.2.3. <i>Mise en place de l'instrumentation</i>	17
3. Les résultats	19
3.1. Augmentation de l'hydrologie	19
3.2. Augmentation de l'érosion	22
3.3. Limites d'utilisation des résultats	23
4. Enseignements du projet	25



1. Pourquoi ce guide ?

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.

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>.

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

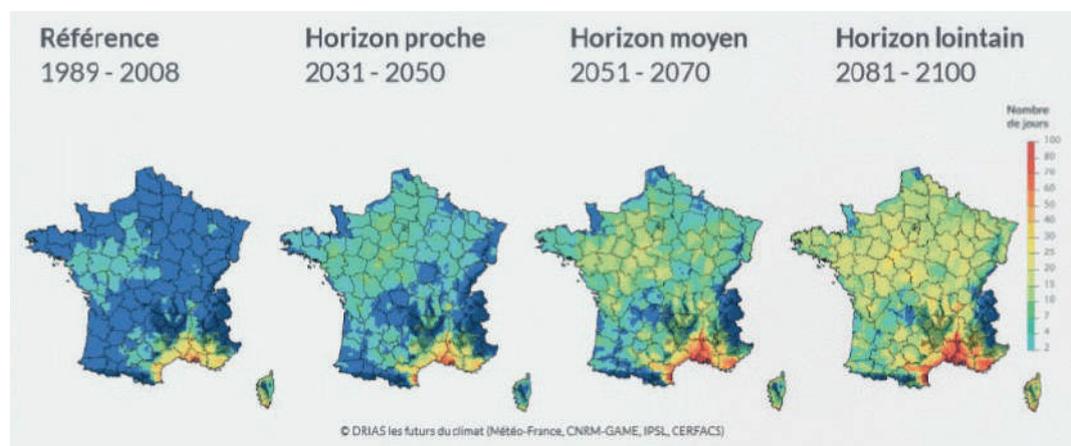


Figure 1: nombre de jours avec indice de feu météorologique supérieur à 40 (scénario à émissions fortes).

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 en 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'enfoncement 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'état de la connaissance actuelle et les limites sur le ruissellement et l'érosion

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

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.

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

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 gênant. Une fiche action DGPR 2022-2023 est en cours de rédaction pour évaluer la pertinence de prendre en compte ce phénomène.

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.

L'objectif de cette étude de cas est donc de préciser, par la mesure, l'augmentation de l'hydrologie sur des terrains que l'on rencontre fréquemment sur le département des PYRENEES-ORIENTALES et qui sont soumis à un aléa Feu de forêt fort.

1.3.2 Erosion et ravinement

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 maquis 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*).

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 « splash⁵ », cumul des pluies et intensités horaires.

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.

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 donc de préciser, par la mesure sur des parcelles d'érosion, l'augmentation de l'érosion hydrique sur des terrains que l'on rencontre fréquemment sur le département des PYRENEES-ORIENTALES et qui sont soumis à un aléa Feu de forêt fort.

3. à 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 (*PIETRASZEK, 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.



2. La méthodologie proposée

2.1 Les objectifs

La synthèse bibliographique donne des gammes très larges en ce qui concerne l'augmentation de l'hydrologie et de l'érosion.

L'objectif de cette étude est de quantifier très précisément 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 à dominante schisteuse.

2.2 L'approche expérimentale

La quantification précise des processus érosifs post-incendie est rendue possible grâce à la mise en place de parcelles expérimentales de mesures hydro-sédimentaires.

L'objectif de cette étude est de quantifier très précisément 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 à dominante schisteuse.

2.2.1 Principe de l'instrumentation

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 le schéma suivant :

- **Mesures en continu :**
 - › débits ruisselés
 - › pluviométrie à faible pas de temps
- **Mesures de bilans :**
 - › masse sédimentaire érodée

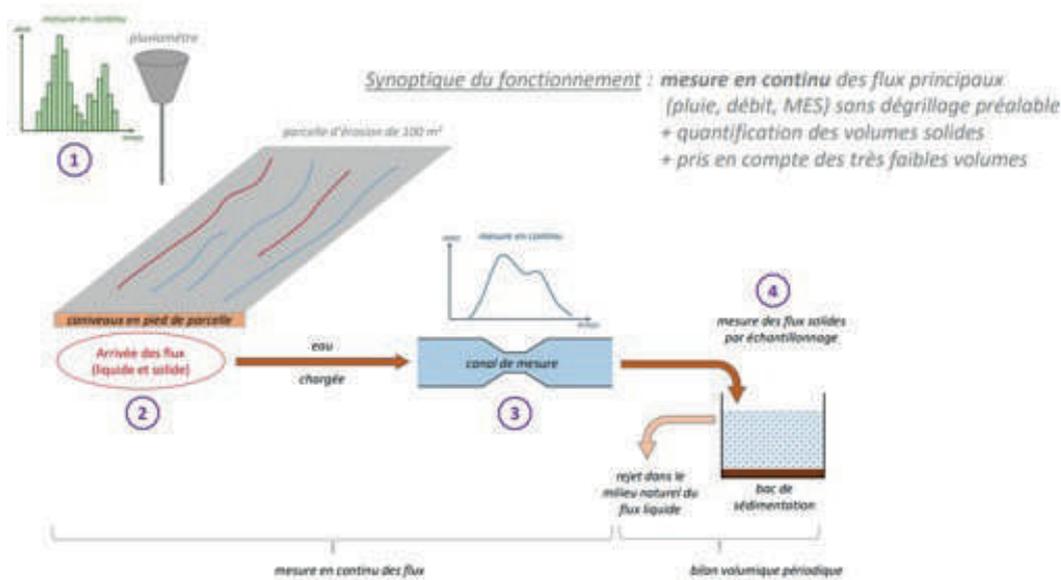


Figure 2: schéma de principe du fonctionnement d'une parcelle d'érosion expérimentale.

Afin de 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 :

- 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 témoin**)

Chacune des parcelles possède une surface de l'ordre de 100 m² (5 mètres de large pour 20 mètres de long dans le sens de la pente). La délimitation des parcelles est réalisée avec des bordures posées et tassées sur le terrain naturel (et non fichées dans le sol) afin d'éviter autant que possible de remuer le sol et perturber la mesure de l'érosion réelle.

Le canal jaugeur utilisé est de type Hs-Flume 0,8 foot. Ce type d'équipement permet de mesurer des débits sur une large gamme [0,0085 l/s - 12,94 l/s] et est peu sensible au phénomène d'ensablement du fond du canal.

2.2.2 Choix du site

L'ensemble des équipements ont été conçus et dimensionnés pendant l'été 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 priorité :

- la Côte Vermeille
- les Albères
- Les Fenouillèdes
- Le bas Vallespir
- Les Aspres
- L'Aude – Corbières Alaric

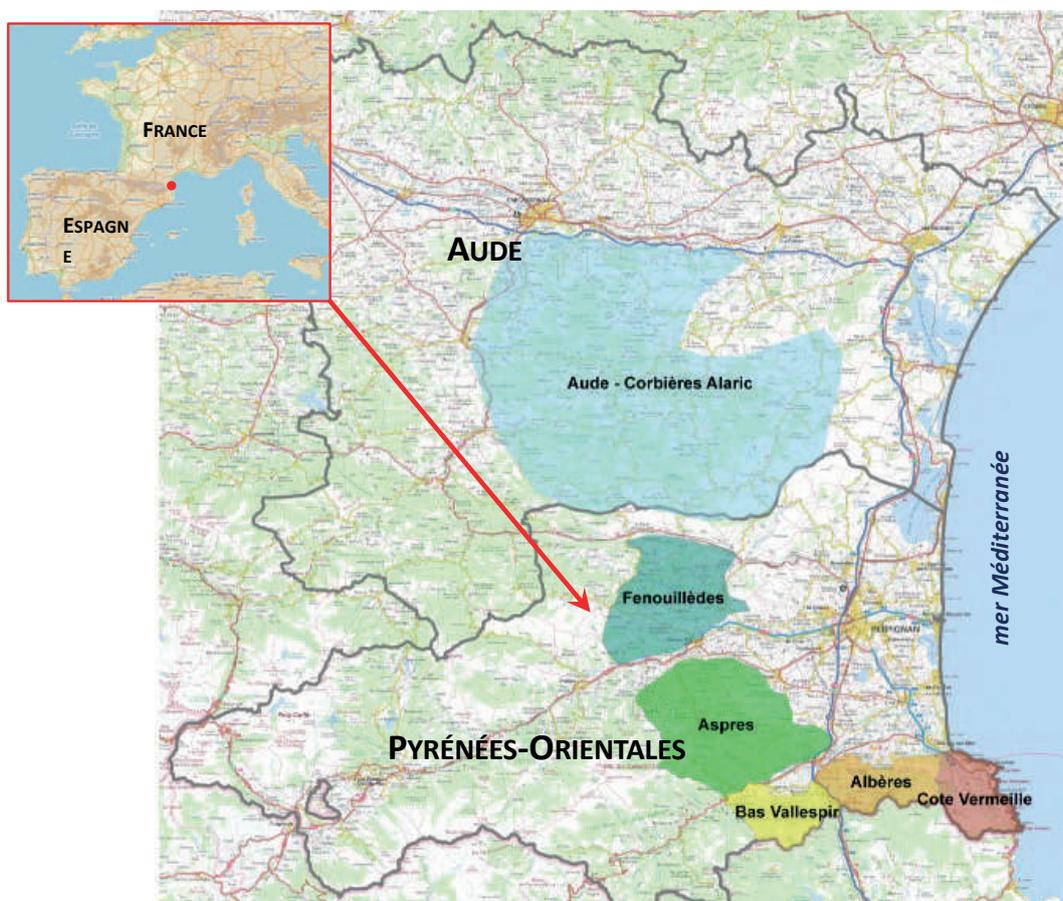


Figure 3: localisation des sites possibles pouvant être instrumenter en cas de survenue d'un incendie.

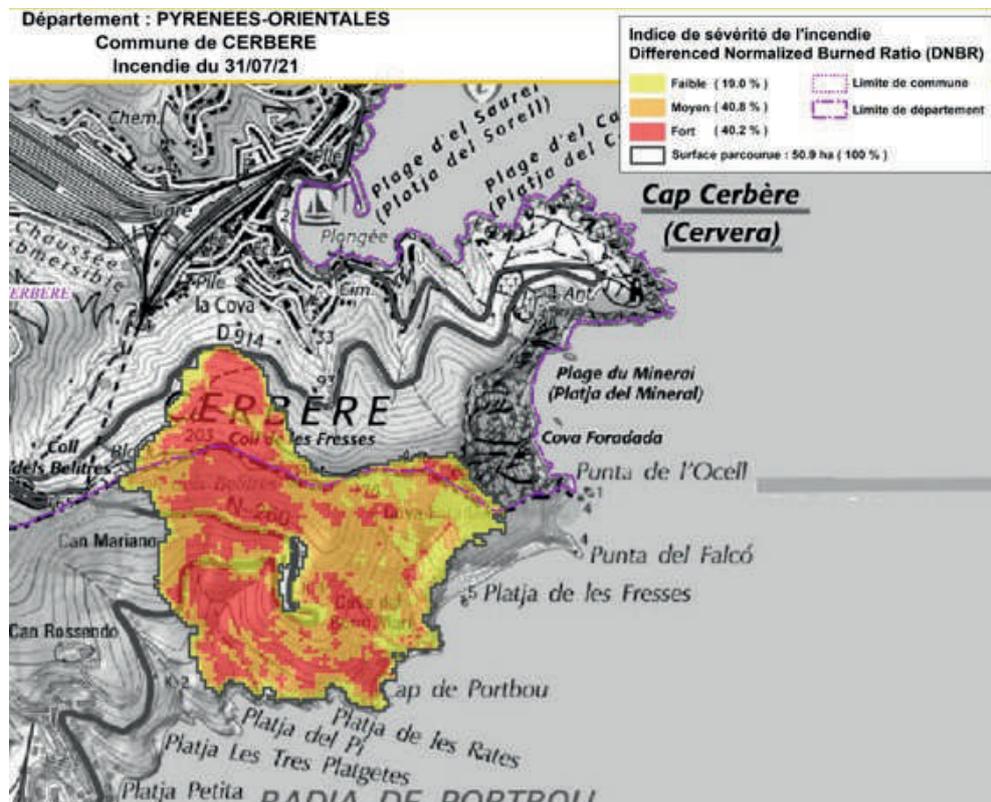
Le 31 juillet 2021, un incendie s'est déclaré sur la Commune de Cerbère, et a parcouru, poussé par une forte tramontane, 51 ha jusqu'à PORTBOU (10 ha coté français et 41 ha côté espagnol).

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 Cerbère (relevant du régime forestier). L'indice de sévérité sur la végétation est majoritairement Fort.



Figure 4: Départ du feu vers 17 h le 31/07/2021 (en haut à gauche, vue depuis les hauteurs de CERBERE, chemin des vignes). Développement du feu (en haut à droite) et emprise finale à cheval sur la frontière France-Espagne (en bas à droite).



Le 31 juillet 2021, un incendie s'est déclaré sur la Commune de Cerbère, et a parcouru, poussé par une forte tramontane, 51 ha jusqu'à PORTBOU (10 ha coté français et 41 ha côté espagnol).

La végétation incendiée est comp

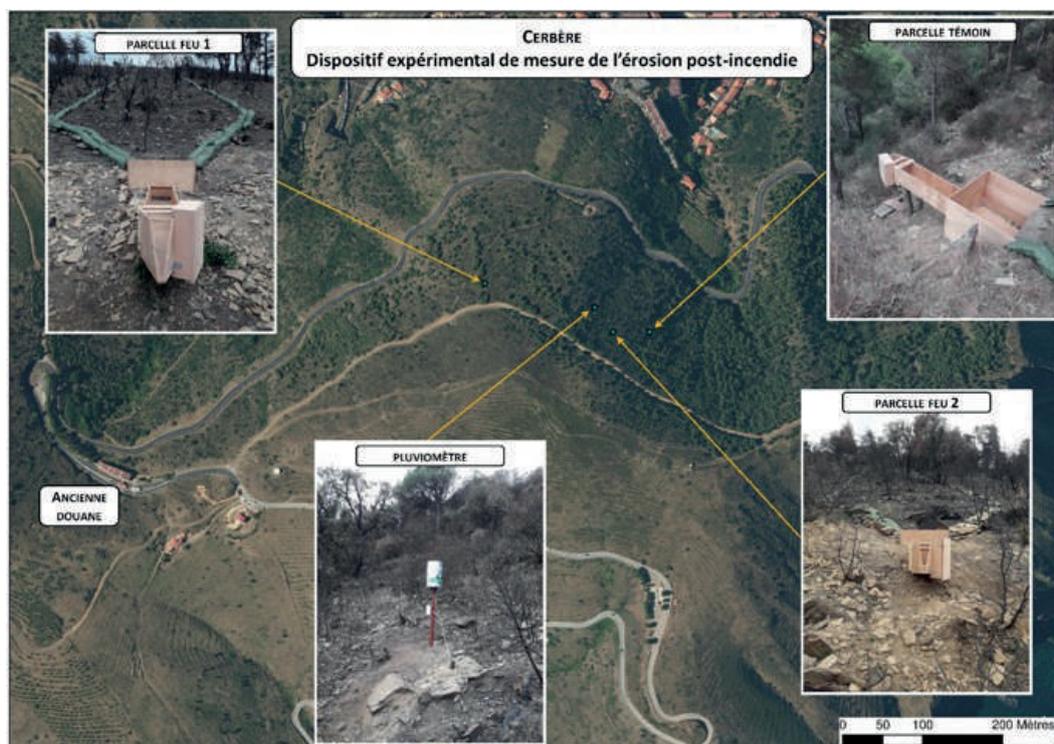
2.2.3 Mise en place de l'instrumentation

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 commencer à lessiver les sols.

Le dispositif est composé de :

- 3 parcelles de mesure de l'érosion
 - › 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 (disposé au centre des 3 parcelles)



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

Les 3 parcelles d'érosion sont identiques, et sont composés de :

- 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 rendu 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 débitmètre.



3. Les résultats

3.1 Augmentation de l'hydrologie

L'expérimentation a été faite initiée pendant 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 20/05/2022, c'est-à-dire sur une durée de 7 mois. 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.

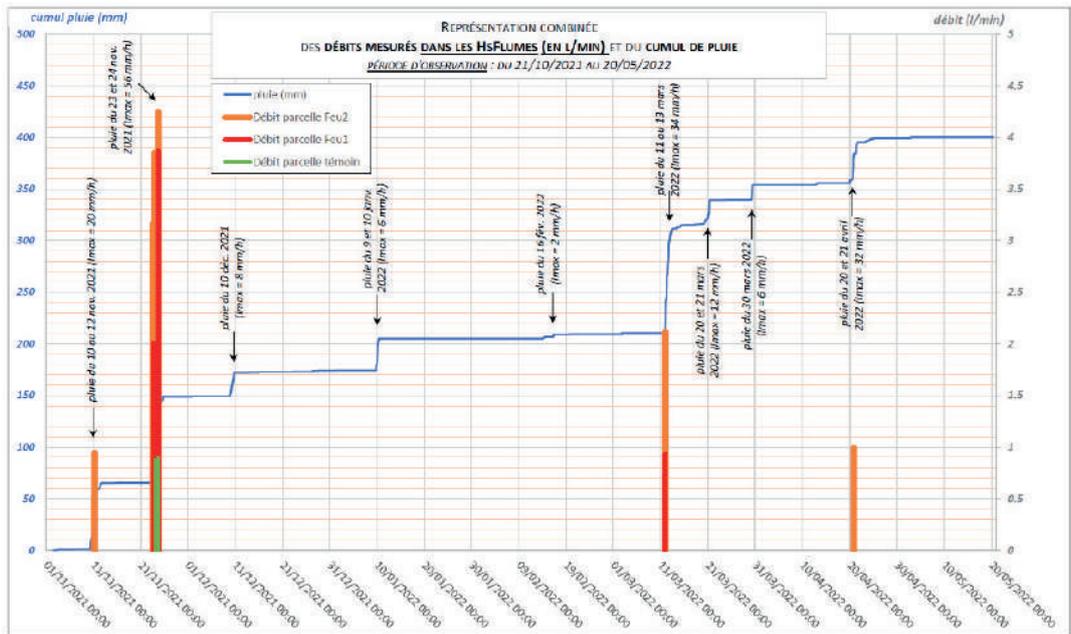
Le graphique ci-dessous illustre le bilan des réponses hydrologique sur une saison hydrologique.

On remarque que la parcelle Feu 2 (parcelle incendiée la plus pentue) réagit très vite et le plus fortement. La parcelle Feu 1 (parcelle incendiée moins pentue) réagit moins rapidement et plus modérément que la parcelle Feu 2. La parcelle Témoin réagit peu.

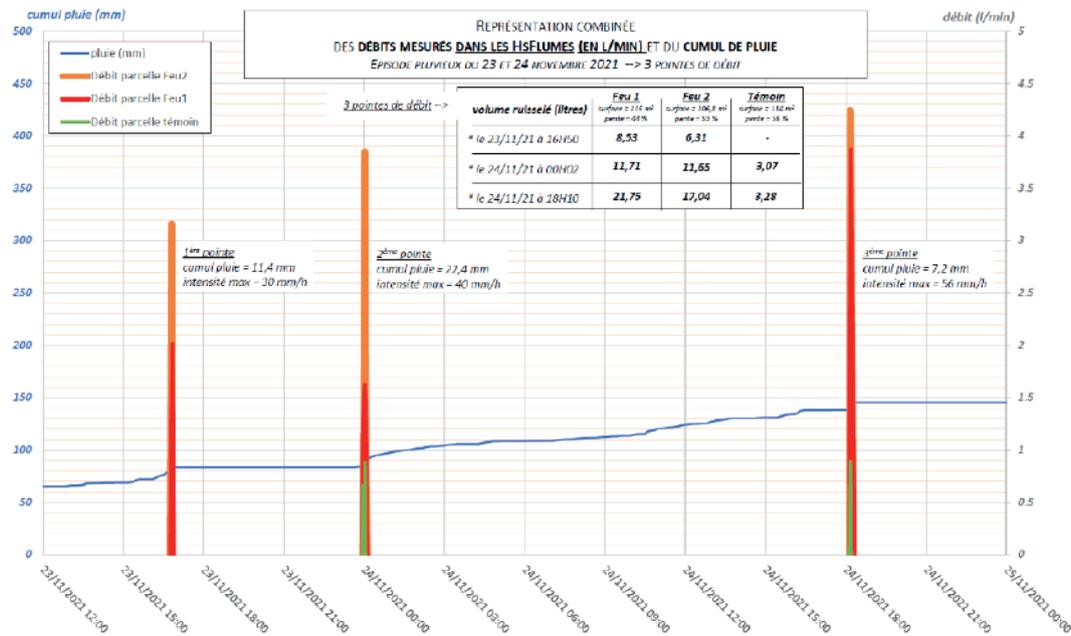
La réponse hydrologique est très liée à la valeur de l'intensité pluvieuse, et non au cumul total de la pluie sur l'épisode.

Les premières réponses hydrologiques (Feu2) se produisent à partir d'une intensité pluvieuse de 20 mm/h.





L'analyse détaillée de l'épisode pluvieux du 23 et 24 novembre 2021 permet de mieux comprendre les seuils pluviométriques de déclenchements des réponses hydrologiques des parcelles



pluie du 24/11 à 00h02	débit max. mesuré (l/min)	coef. multiplicateur	volume ruisselé (litres)	coef. multiplicateur
parcelle végétalisée (témoin) 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

pluie du 24/11 à 18h10	débit max. mesuré (l/min)	coef. multiplicateur	volume ruisselé (litres)	coef. multiplicateur
parcelle végétalisée (témoin) 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

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.

On en conclut donc que 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.

3.2 Augmentation de l'érosion

Les produits d'érosion sont prélevés périodiquement dans les bacs de sédimentation pour être pesés. Pendant la période de mesure, les sédiments ont été prélevés 2 fois : le 17 novembre 2021 et le 7 janvier 2022. Lors des autres visites, la quantité déposée n'était pas suffisante pour être mesurée.

Les taux équivalent d'érosion sont très variables, entre la parcelle témoin végétalisée (7 Kg/ha), la parcelle Feu 1 (53 Kg/ha) et la parcelle Feu 2 (80 Kg/ha).

Sur la parcelle témoin, on retrouve majoritairement 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.

	date de relevés des sédiments		sur la période 21/10/2021 --> 20/05/2022	
	17/11/2021 masse en grammes	07/01/2022 masse en grammes	Cumul (kg) sur la parcelle	érosion équivalente t/ha
parcelle Feu 1 <i>type de dépôts</i>	170 <i>nombreux sables et cailloux beaucoup de suie et débris de végétaux</i>	440 <i>nombreux sables et cailloux beaucoup de suie et débris de végétaux</i>	0.61	0.053
parcelle Feu 2 <i>type de dépôts</i>	315 <i>nombreux sables et cailloux beaucoup de suie et débris de végétaux</i>	540 <i>nombreux sables, forte proportion de cailloux beaucoup de suie et débris de végétaux</i>	0.855	0.080
parcelle Témoin <i>type de dépôts</i>	pas de sédiments -	75 <i>sables très fins et suie beaucoup de débris de végétaux</i>	0.075	0.007

Si l'on considère le taux d'érosion comme une référence, on observe que le potentiel érosif est 8,1 fois plus élevé sur la parcelle Feu 1 et 11,4 fois plus élevé sur la parcelle Feu 2.

Bilan sédimentaire sur la période du 21/10/2021 au 20/05/2022	masse sédiments mesuré (kg)	Erosion équivalente (t/ha)	coef. multiplicateur
parcelle végétalisée pente = 56 %	0,075	0,007	référence
parcelle Feu 1 pente = 44 %	0,61	0,053	x 8,1
parcelle Feu 2 pente = 53 %	0,855	0,080	x 11,4

3.3 Limites d'utilisation des résultats

Les résultats de l'analyse peuvent paraître précis, mais il faut les prendre avec une certaine précaution, notamment du fait que :

- la taille très restreinte des parcelles conduit à s'intéresser à des grandeurs non moyennées, contrairement à un bassin versant de plus grande taille, ce qui conduit à obtenir des grandeurs qui se situent dans la marge forte de la grandeur réelle ;
- la faible durée de la période de mesure ne permet pas de moyennner 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 ;
- 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 ;

Plus que les valeurs absolues des grandeurs, nous conseillons plutôt de considérer les tendances mises en évidence et la comparaison en relatif entre parcelles.





4. Enseignements du projet

La qualité des résultats dépend des paramètres suivants :

- Localisation et configuration adaptée aux mesures recherchées ;
- Qualité de la mise en place des équipements ;
- Choix des équipements, et notamment leur précision et leur fiabilité ;
- La capacité à se déplacer souvent sur site pour la supervision du dispositif ;
- La possibilité de travailler sur des chroniques longues, c'est-à-dire sur au moins 2 années hydrologiques ;
- La survenue immédiatement après feu d'une pluviométrie assez remarquable.

Cette expérimentation met 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 sur l'augmentation des processus hydro sédimentaire :

- Les sols deviennent plus réactifs aux précipitations
- Les volumes ruisselés et les débits sont augmentés, dans des rapports remarquables de 1 à 6
- L'érosion hydrique est fortement augmentée, dans des rapports de 1 à 11, avec des processus érosifs intenses pendant la première année après le feu ;

