

Les risques hydrauliques induits après un incendie : *comment les évaluer et comment agir ?*

Journées Techniques Risques et Territoires du CEREMA

Thématique → les inondations par ruissellement : quelle gestion pour nos territoires ?

AIX-EN-PROVENCE – Mardi 10 octobre 2023

L'impact du feu sur les phénomènes gravitaires

Inventaire ONF – DFCI2020 (31 évènements recensés [1982 – 2018])

- Avalanche

2 évènements
sur 31

- disparition du boisement en zone de départ → avalanches plus fréquentes et propagations plus lointaines
- zone transit/arrivée incendiée → propagation plus lointaine

- Mouvement de terrain (chute de blocs, glissement)

11 évènements
sur 31

- feu fracture la roche jusqu'à 100 fois plus que le gel/dégel
- disparition boisements/ouvrages en zone de départ ou de transit → chutes de blocs plus fréquentes et intenses
- faible impact sur les glissements de surface / très faible sur glissements profonds

- Phénomènes hydrauliques (ruissellement, ravinement, inondation, crue torrentielle, lave torrentielle)

18 évènements
sur 31

- moins d'interception de la pluie, coef. ruissellement plus forts
- sols nus vulnérables aux processus érosifs



2001

2013

col de Peyresourde (65)
pas d'avalanche avant 2002
Feu en février 2002
[2005 à 2017] → 18 avalanches



route du littoral (974)
incendie du
30/09/2016



ravinement d'une
piste forestière dans
le Var après incendie
de 2017



lave torrentielle en
Corogne après
incendie de 2006

L'impact du feu sur l'aggravation des risques naturels

Intensité et durée de la majoration du risque

Phénomènes →	Glissement de terrain	Avalanche	Chute de blocs	« Hydrauliques »
<u>Emprise géographique</u>	<u>Emprise restreinte</u> : surfaces et linéaires limités et bien identifiés	<u>Emprise restreinte</u> : surfaces et linéaires limités et bien identifiés	<u>Emprise variable</u> : surfaces réduites en zone urbanisées mais grands linéaires de réseaux de transport	<u>Emprise étendue</u> : nombreux Bassins Versants / processus de ruissellement diffus
Risque incendie sur les zones de phénomènes	<i>spécifique à chaque département</i>	<i>spécifique à chaque département</i>	<i>spécifique à chaque département</i>	<i>spécifique à chaque département</i>
<u>Intensité</u> de la majoration du risque	= OU +	+++	+++	= à +++
	<i>+ si détérioration du dispositif de drainage</i>	<i>si passage du feu sur ouvrages et/ou boisement</i>	<i>si passage du feu sur ouvrages ou disparition boisement dans zone de départ ou de transit</i>	<i>en fonction du % BV parcouru, du risque préexistant, de la géologie, de la topo, etc.</i>
<u>Durée</u> de majoration avant retour à situation normale	quelques mois (si réparations !)	quelques mois (si intervention) jusqu'à 50 ans (si régénération naturelle du boisement)	quelques mois (si intervention) jusqu'à 50 ans (si régénération naturelle du boisement)	2 à 5 ans en moyenne (processus de re-végétalisation naturelle)

L'impact du feu sur l'aggravation des risques naturels

objet de la
présentation



Intensité et durée de la majoration du risque

Phénomènes →	Glissement de terrain	Avalanche	Chute de blocs	« Hydrauliques »
<u>Emprise géographique</u>	<u>Emprise restreinte</u> : surfaces et linéaires limités et bien identifiés	<u>Emprise restreinte</u> : surfaces et linéaires limités et bien identifiés	<u>Emprise variable</u> : surfaces réduites en zone urbanisées mais grands linéaires de réseaux de transport	<u>Emprise étendue</u> : nombreux Bassins Versants / processus de ruissellement diffus
Risque incendie sur les zones de phénomènes	<i>spécifique à chaque département</i>	<i>spécifique à chaque département</i>	<i>spécifique à chaque département</i>	<i>spécifique à chaque département</i>
<u>Intensité</u> de la majoration du risque	= OU +	+++	+++	= à +++
	<i>+ si détérioration du dispositif de drainage</i>	<i>si passage du feu sur ouvrages et/ou boisement</i>	<i>si passage du feu sur ouvrages ou disparition boisement dans zone de départ ou de transit</i>	<i>en fonction du % BV parcouru, du risque préexistant, de la géologie, de la topo, etc.</i>
<u>Durée</u> de majoration avant retour à situation normale	quelques mois (si réparations !)	quelques mois (si intervention) jusqu'à 50 ans (si régénération naturelle du boisement)	quelques mois (si intervention) jusqu'à 50 ans (si régénération naturelle du boisement)	2 à 5 ans en moyenne (processus de re-végétalisation naturelle)

Les risques hydrauliques induits – pourquoi s’y intéresser ?

Pour répondre aux inquiétudes des élus et des riverains après l’incendie

- Aggravation avérée des risques hydrauliques **MAIS** ...
- ... crainte parfois « exagérée »
 - visuel des modelés de terrain met en évidence des processus déjà existants
 - inquiétude des possibles embâcles de bois brûlés
- faire la distinction entre le « ressenti » et la réalité de l’intensité des risques induits
- objectiver la connaissance sur l’augmentation de l’hydrologie et du transport solide
- ... **mitigation des risques post-incendie si actions adaptées**
 - oublier le réflexe des reboisements systématiques
 - comprendre la temporalité de re-végétalisation des versants et adapter les mesures
 - mesures de sauvegarde à prioriser

Pour anticiper des actions de lutte et éviter qu’une zone sensible soit touchée par l’incendie

- **Identifier préalablement les secteurs sensibles** (*PAFI forêts de protection par exemple*)
 - Prioriser les moyens → essayer de protéger des versants à forts risques hydrauliques induits au détriment d’autres versants moins problématiques



Les risques hydrauliques induits – comment les évaluer ?

Evaluation des risques hydrauliques

- Les phénomènes « faciles » à quantifier

- ruissellement (avec ou sans érosion) et inondation

→ outils disponibles pour esquisser des emprises maximales : méthode ExZEco ([lien explicatif](#))

→ approches hydrologiques simplifiées (méthode rationnelle, SCS, ...) pour comparer avant/après feu

→ apports sédimentaires : méthodes empiriques liées aux sites étudiés / régionalisation incertaine

- Les phénomènes « difficiles » à évaluer

- crue torrentielle et lave torrentielle

→ difficultés d'identifier des zones de production sédimentaire « libérées » par l'incendie

→ connaissance avant feu souvent incomplète ou inexistante – comparaison avant/après erronée

Evaluation des facteurs aggravants

- Embâcles de bois brûlés

- Peu de retours d'expérience en post-incendie

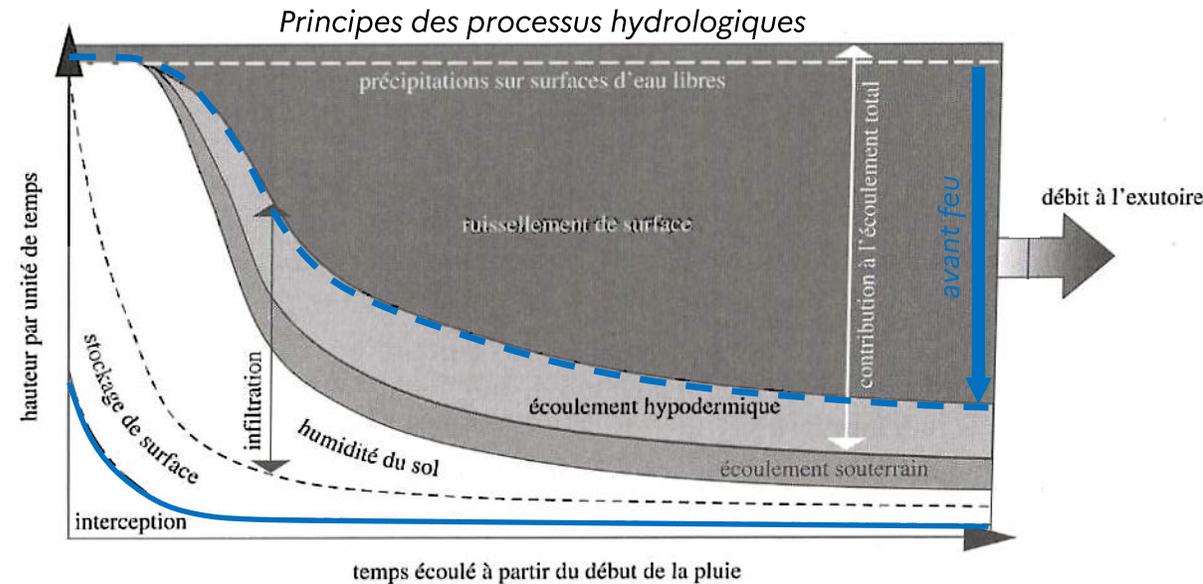
→ synthèse bibliographique pauvre sur le sujet – mesure de gestion « classiques » préconisées ([lien sur mesures gestion des flottants](#))



Les risques hydrauliques induits – comment les évaluer ?

Comprendre les processus pour mieux évaluer les risques

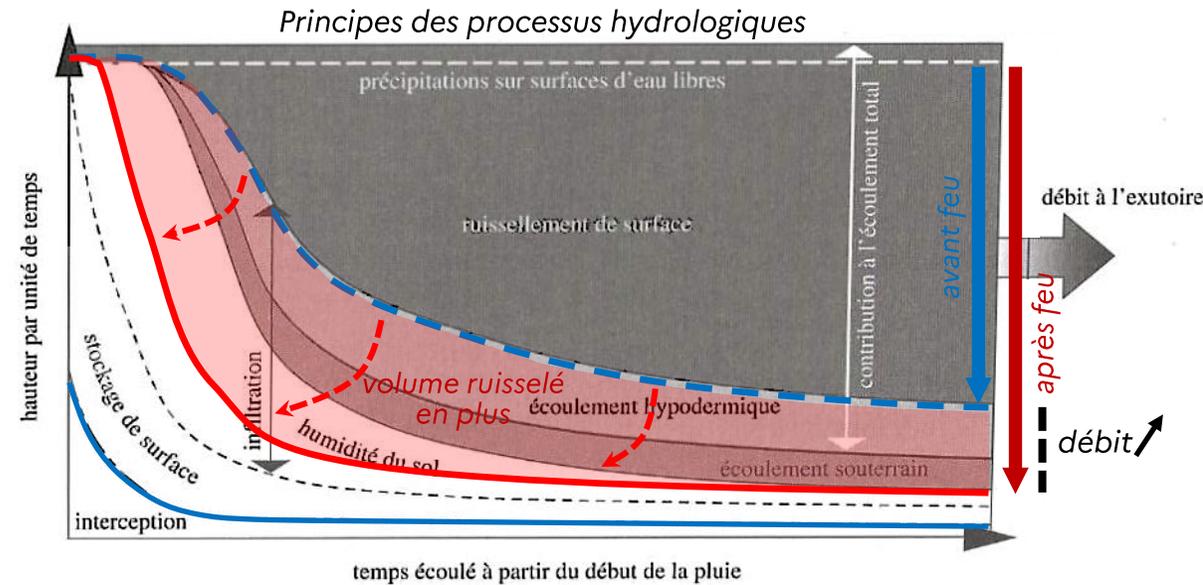
- **Interception de la pluie par la végétation**
 - jusqu'à 50 % pour une pluie faible (< 15 mm)
 - 10 - 20 % pour une pluie significative (> 15 mm)
 - interception plus forte en début de pluie
 - interception amoindrie si pluie avec vent
- **Rôles hydrologiques de la végétation**
 - strate forestière et arbustive : interception de 10-20 % de la lame d'eau précipitée → réduction débit
 - végétation au sol : ralentissement de la dynamique des écoulements → augmentation temps de réponse
- **Temporalité**
 - hydrologie modifiée pendant 2 à 5 ans après feu
 - dépend beaucoup de la reconquête de la végétation au sol et de la strate arbustive (garrigues)



Les risques hydrauliques induits – comment les évaluer ?

Comprendre les processus pour mieux évaluer les risques

- **Interception de la pluie par la végétation**
 - jusqu'à 50 % pour une pluie faible (< 15 mm)
 - 10 - 20 % pour une pluie significative (> 15 mm)
 - interception plus forte en début de pluie
 - interception amoindrie si pluie avec vent
- **Rôles hydrologiques de la végétation**
 - strate forestière et arbustive : interception de 10-20 % de la lame d'eau précipitée → réduction débit
 - végétation au sol : ralentissement de la dynamique des écoulements → augmentation temps de réponse
- **Temporalité**
 - hydrologie modifiée pendant 2 à 5 ans après feu
 - dépend beaucoup de la reconquête de la végétation au sol et de la strate arbustive (garrigues)



- Contexte du pourtour méditerranéen

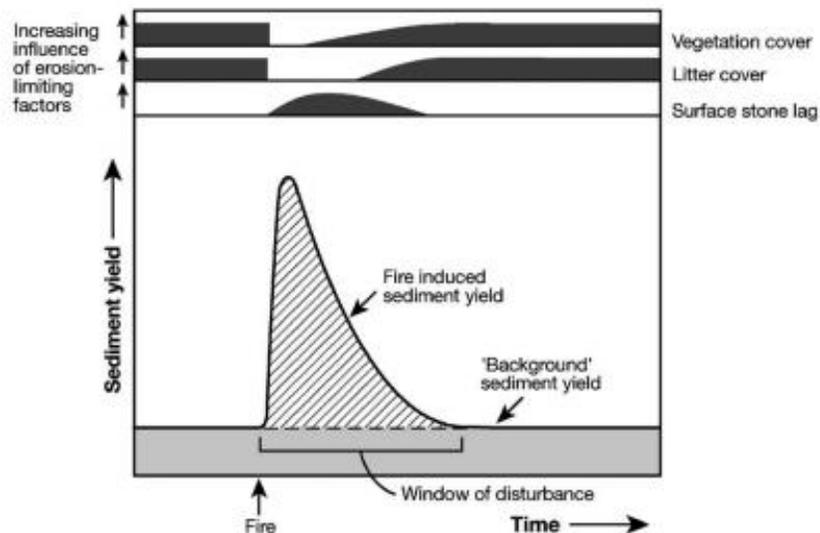
- augmentation du taux de ruissellement :
 - **x2** pour les faibles pluies (# Q_{10ans})
 - **+ 30 %** pour les pluies intenses (C_r plafonné à 0,9)
- sol peu épais → coef. de ruissellement déjà forts avant feu (0,4 à 0,6) → 0,6 à 0,8 en post-incendie

Les risques hydrauliques induits – comment les évaluer ?

Comprendre les processus pour mieux évaluer les risques

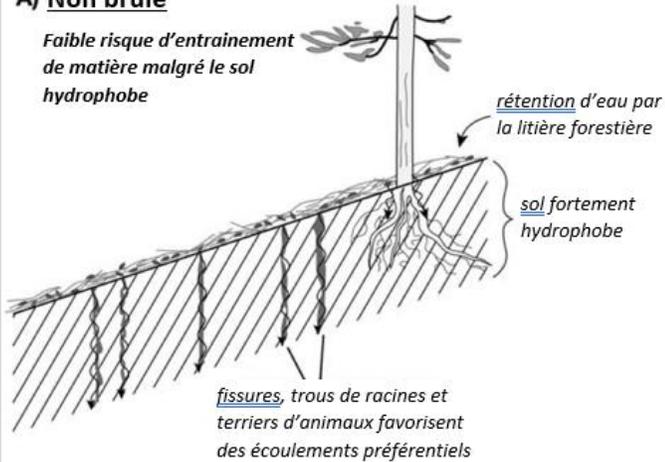
- Effet des incendies sur l'érosion des sols

- intensité du feu définie selon la combustion de la végétation → indice normalisé
- déstructuration du sol selon température au sol → difficile à évaluer (≠ intensité du feu)
- hydrophobie peu observée en contexte méditerranéen (sauf sols argileux profonds avec beaucoup de combustibles)



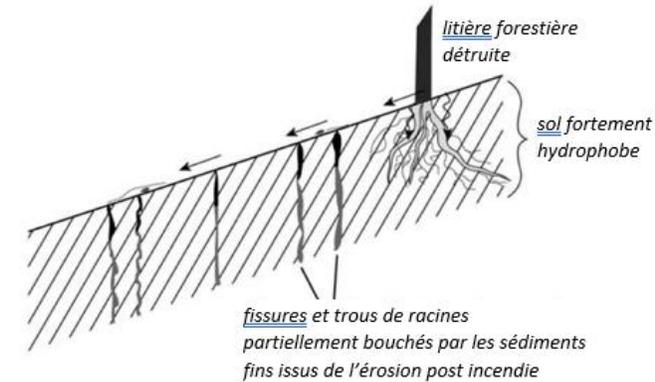
A) Non brûlé

Faible risque d'entraînement de matière malgré le sol hydrophobe



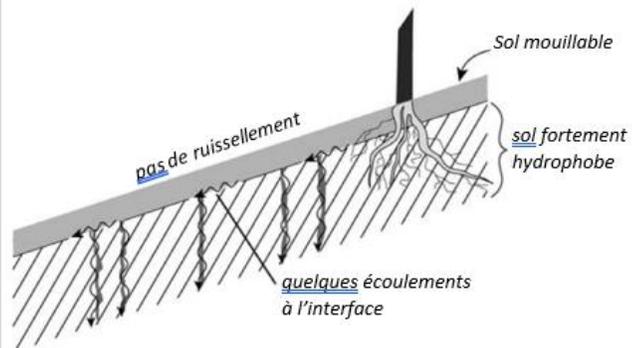
B) Feu de faible à moyenne intensité

Fort risque d'entraînement de matière



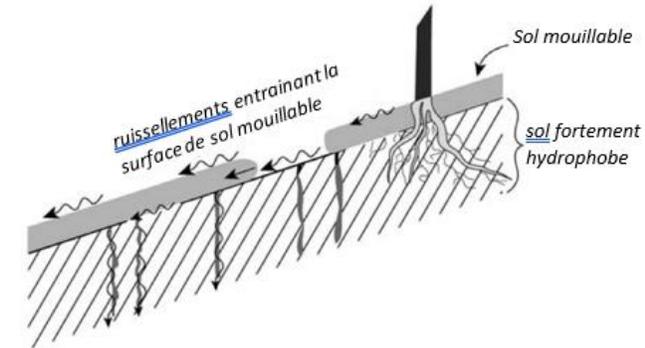
C) Feu de forte intensité

Capacité de stockage de la couche mouillable non saturée



D) Feu de forte intensité

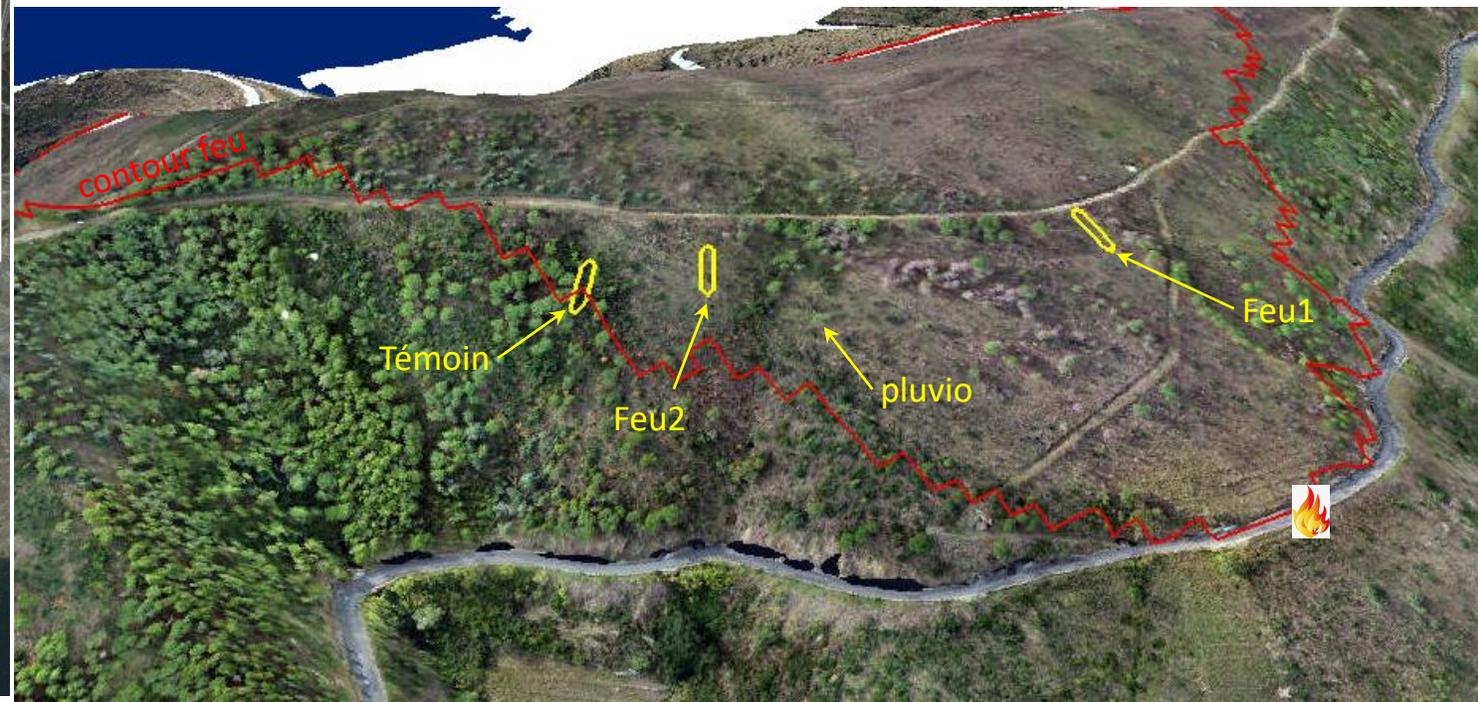
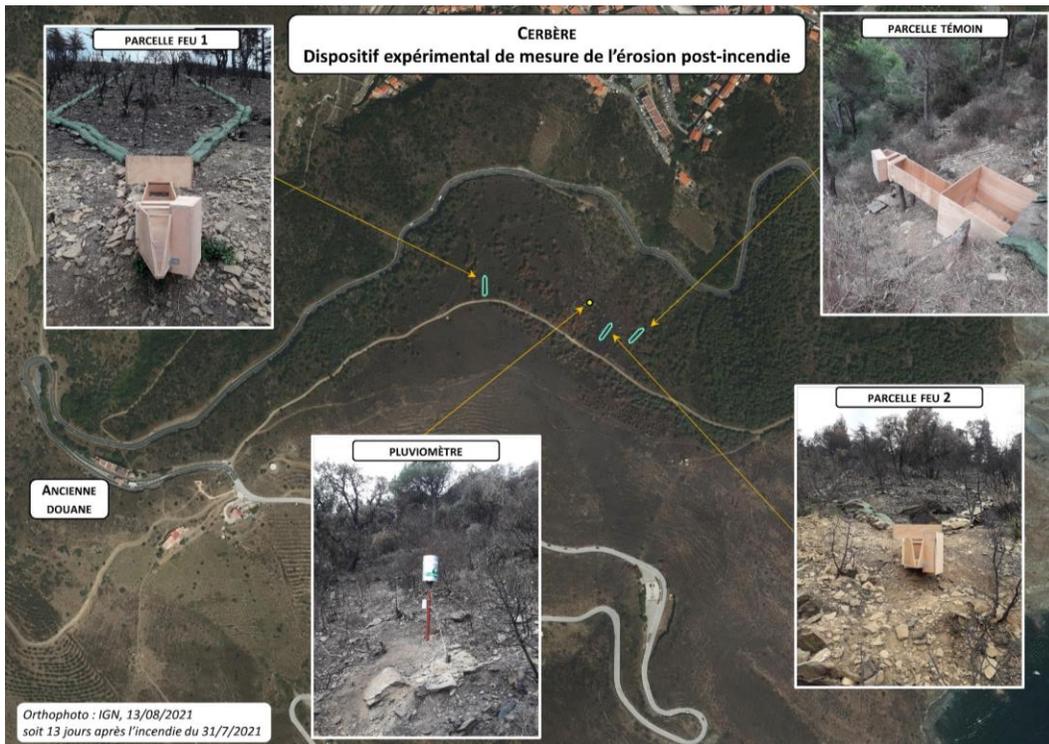
Capacité de stockage de la couche mouillable dépassée



Les risques hydrauliques induits – comment les évaluer ?

Comprendre les processus pour mieux évaluer les risques

- **Projet MONTCLIMA – mesure des processus hydro-sédimentaires en contexte méditerranéen**
 - ruissellement : **débit jusqu'à x6** ; réponse hydrologique 2x plus facile (20 mm/h sur parcelle incendiée contre 40 mm/h sur parcelle témoin)
 - érosion : **10 x plus importante** sur parcelle incendiée – diminue avec reprise végétation

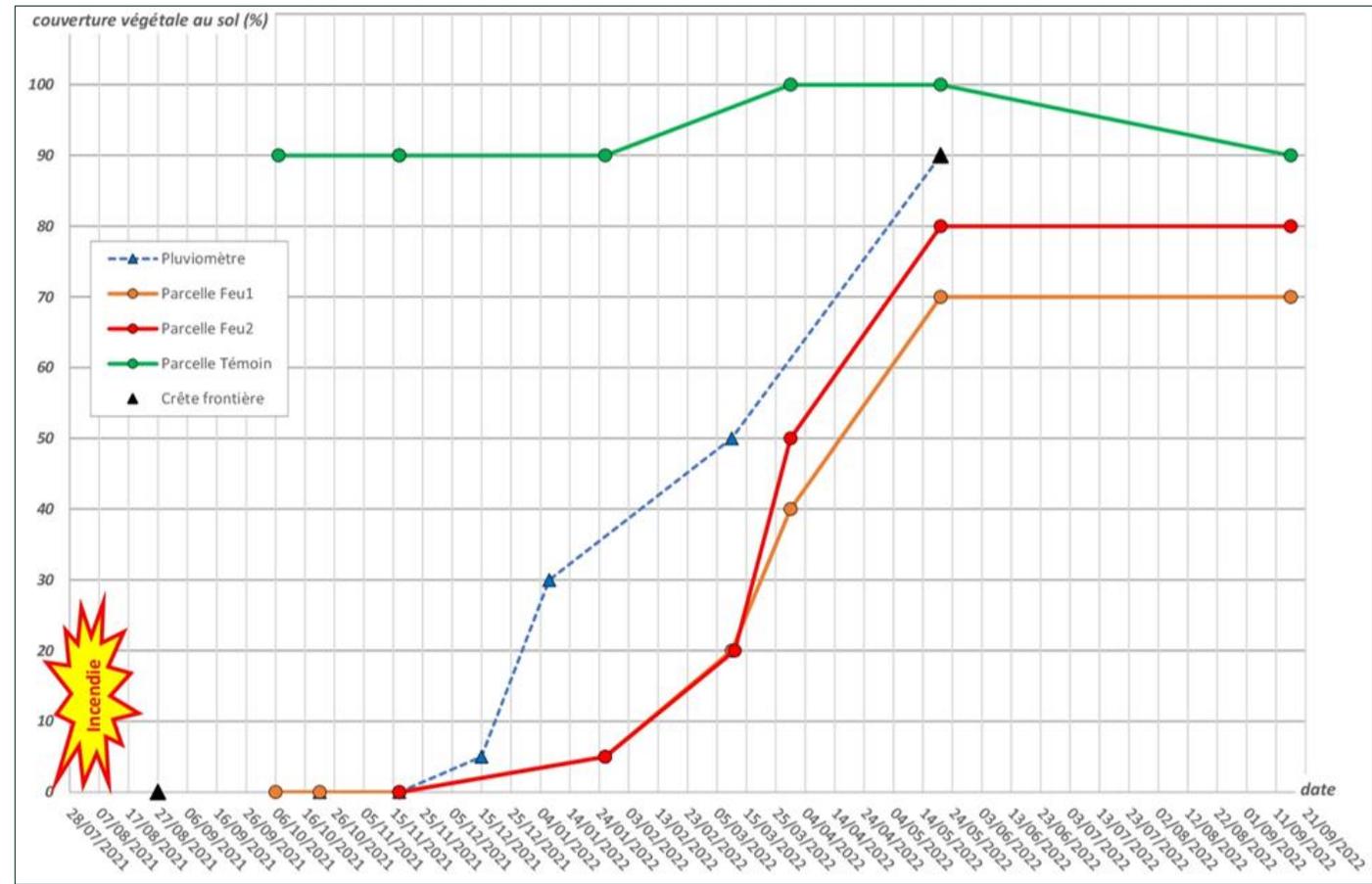
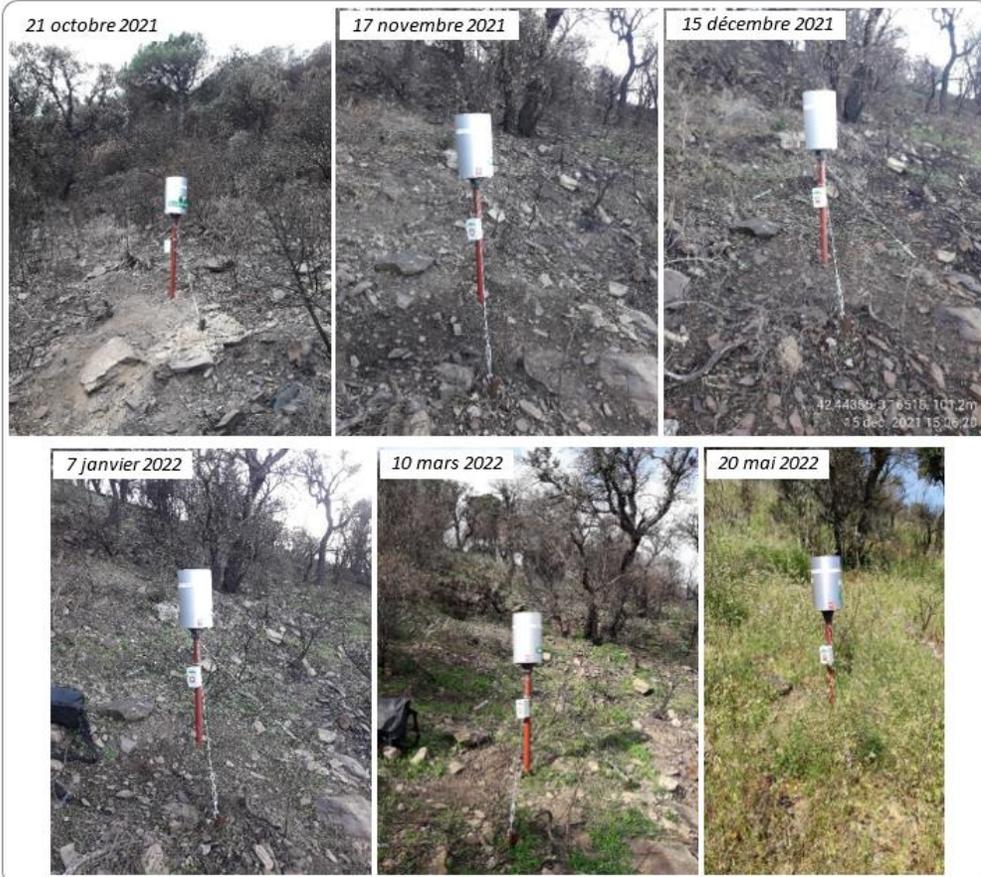


Les risques hydrauliques induits – comment les évaluer ?

Comprendre les processus pour mieux évaluer les risques

- dynamique de la végétation (résultats du projet Montclima)

- faible reprise des boisements v/s reprise très rapide de la végétation au sol (80% de couverture après 10 mois)



Les risques hydrauliques induits – comment les évaluer ?

Comprendre les processus pour mieux évaluer les risques – EN RÉSUMÉ

- Modification de l'hydrologie

- à petite échelle : → ruissellement plus fort (x2 ou x3) après feu (diminue + ou – rapidement selon reconquête végétale)
 - volumes ruisselés plus importants (> +30 %)
 - réponse « impulsionnelle »
- à l'échelle d'un BV : débits de crue plus forts → jusqu'à (x2) sur les épisodes courants (< Q_{10ans})
 - + 30% pour les crues intenses (> Q_{10ans})
 - temps de réponse plus court (jusqu'à divisé par 2)

- Erosion et ravinement

- modification imperméabilité (hydrophobie = ruissellement plus fort) de la strate supérieure du sol
- altération de la structure du sol → facilite la formation de ravines → plus de production sédimentaire = plus de volume de sol érodable

Les risques hydrauliques induits – comment agir ?

La bonne temporalité – priorisation des actions



→ SÉCURISATION

- **Fermeture** des massifs forestiers et diagnostics sur l'abattage des **arbres dangereux**;
- Faciliter l'intervention des **gestionnaires des réseaux** endommagés (électricité, télécoms, etc.);
- Réouverture/limitation des massifs en fonction du **risque résiduel**

15 jours après l'incendie

→ ANALYSE SOMMAIRE SUR LES RISQUES

- Identification des **phénomènes** pouvant **s'aggraver ou émerger** et caractérisation des **enjeux menacés**;
- Évaluation du degré d'augmentation des aléas et du risque → en déduire **l'augmentation des risques**;
- Adaptation des mesures de sauvegarde des enjeux en **actualisant le PCS**;
- Gestion de la **ripisylve** au droit des ouvrages et des enjeux
- Le reboisement rapide des terrains incendiés : une mauvaise idée pour réduire rapidement les risques (temporalité !)

3 mois après l'incendie
(AVANT saison fortes pluies)

→ ANALYSE APPROFONDIE

- Complément du diagnostic pour **actualiser les cartes d'aléas**;
- **Évaluation de la nécessité** de procéder à des **reboisements, enherbements et/ou fascines**,
- Évaluation de la nécessité de mettre en place des ouvrages lourds (digue, plage de dépôts, etc.) en **cas de fort transport solide** ;
- Poursuite de la **gestion de la ripisylve** le cas échéant;
- Évaluation de l'opportunité d'**exploiter les bois incendiés**
- Questionnement sur le **volet paysager, biodiversité** et essences adaptées au CC

1 an après l'incendie

Les risques hydrauliques induits – comment agir ?

La bonne temporalité – priorisation des actions

comment faire ?

3 mois après l'incendie
(AVANT saison fortes pluies)

1 an après l'incendie

15 jours après l'incendie



→ SÉCURISATION

- **Fermeture** des massifs forestiers et diagnostics sur l'abattage des **arbres dangereux**;
- Faciliter l'intervention des **gestionnaires des réseaux** endommagés (électricité, télécoms, etc.);
- Réouverture/limitation des massifs en fonction du **risque résiduel**

→ ANALYSE SOMMAIRE SUR LES RISQUES

- Identification des **phénomènes** pouvant **s'aggraver ou émerger** et caractérisation des **enjeux menacés**;
- Évaluation du degré d'augmentation des aléas et du risque → en déduire **l'augmentation des risques**;
- Adaptation des mesures de sauvegarde des enjeux en **actualisant le PCS**;
- Gestion de la **ripisylve** au droit des ouvrages et des enjeux
- Le reboisement rapide des terrains incendiés : une mauvaise idée pour réduire rapidement les risques (temporalité !)

→ ANALYSE APPROFONDIE

- Complément du diagnostic pour **actualiser les cartes d'aléas**;
- **Évaluation de la nécessité** de procéder à des **reboisements, enherbements et/ou fascines**,
- Évaluation de la nécessité de mettre en place des ouvrages lourds (digue, plage de dépôts, etc.) en **cas de fort transport solide** ;
- Poursuite de la **gestion de la ripisylve** le cas échéant;
- Évaluation de l'opportunité d'**exploiter les bois incendiés**
- Questionnement sur le **volet paysager, biodiversité** et essences adaptées au CC

Les risques hydrauliques induits – comment agir ?

Réaliser une analyse sommaire sur l'aggravation des risques hydrauliques induits

- **Contrainte de temps**
 - réaliser l'analyse avant les fortes pluies → contexte méditerranéen : délai < 2 à 3 mois
 - commande pas immédiate → réalisation étude ≈ **2 semaines** (études risques existantes ?, SIG, terrain, préconisations)
- **Analyse à adapter selon la surface étudiée et le nombre d'enjeux**
 - emprise importante (plusieurs communes) – *exemple étude post-incendie GONFARON 2021*
 - approche globale (SIG) pour identifier de manière rapide les points critiques – croisement avec données ExZEco
 - calculs hydrauliques sur les points les plus critiques
 - impossible de visiter tous les points – préconisations plus générales
 - emprise restreinte (1 commune) – *exemple étude post-incendie SALSES 2022*
 - approche plus fine avec calculs hydrauliques sur sections de cours d'eau
 - découpage plus fin du BV et application de coef. de ruissellement plus détaillés
 - préconisations d'actions et de travaux plus ciblées

Les risques hydrauliques induits – exemple d'analyse

Réaliser une analyse sommaire – cas d'une emprise importante (enjeux nombreux)

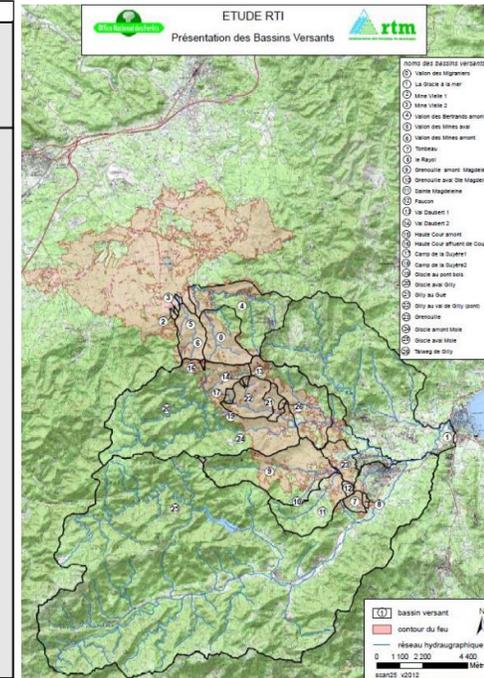
- Analyse SIG pour l'hydrologie

- découpage BV avec % incendié
- méthode rationnelle (hydrologie)
 - C_{r10ans} x3 après feu (plafonné à 0,9)
 - $C_{r100ans}$ après feu égal à 0,9
- débits Q_{10ans} multipliés entre 1,2 et 3
- débits Q_{100ans} peu modifiés

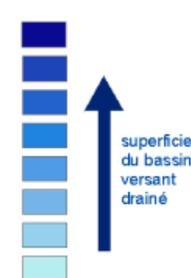
- Croisement Enjeux / emprise ExZEco

- déterminer les niveaux de risque des enjeux
- croisement largeur écoulement/quantité ruisselée
- écoulements en nappe → risque faible
- écoulements concentrés → risque fort

Nom des sous BV	Num des sous BV	Surface km²	Pente moyenne	%S brûlée	méthode rationnelle		
					Q10 Avant	Q10 Apres	Ratio
La Gisle à la mer	1	233	0.29	10	487	587	1.2
Gisle aval Mole	25	198	0.33	12	446	555	1.2
Sainte Magdeleine	11	5.9	0.20	20	26	37	1.4
Gisle aval Gilly	20	33.8	0.35	33	116	197	1.7
Gisle amont Mole	24	65	0.32	35	186	321	1.7
Gisle au pont bois	19	41.5	0.33	35	134	232	1.7
Grenouille aval Ste Magdeleine	10	17.4	0.23	36	62	108	1.7
Grenouille	23	19.7	0.24	37	69	124	1.8
Vallon des Bertrands amont	4	13.3	0.36	43	57	109	1.9
Grenouille amont Magdeleine	9	11.5	0.25	43	46	84	1.8
Tombeau	7	0.77	0.17	66	5	13	2.4
Vallon des Migraniers	0	4.75	0.40	74	26	69	2.6
Haute Cour affluent de Court	16	0.08	0.45	77	1	3	2.7
le Rayol	8	0.18	0.13	77	2	4	2.5
Haute Cour amont	15	0.07	0.46	80	1	3	2.8
Camp de la Suyère1	17	0.26	0.35	84	3	8	2.9
Faucon	12	0.31	0.18	95	3	8	2.9
Vallon des Mines amont	6	2.92	0.43	95	18	57	3.1
Vallon des Mines aval	5	3.02	0.42	95	19	54	2.9
Gilly au val de Gilly (pont)	22	3.66	0.38	95	21	61	2.9
Val Daubert 1	13	0.11	0.45	96	2	5	2.9
Gilly au Gué	21	4.7	0.36	96	25	74	2.9
Val Daubert 2	14	0.05	0.43	96	1	2	2.9
Mine Vieille 1	2	0.10	0.30	98	1	4	3.0
Mine Vieille 2	3	0.06	0.24	99	1	2	3.0
Talweg Gilly	26	0.12	0.36	100	2	5	3.0



données EXZEco



Les risques hydrauliques induits – exemple d'analyse

Réaliser une analyse sommaire – cas d'une emprise importante (enjeux nombreux)

- Le plus important

- Identifier les enjeux les plus vulnérables – faire les investigations de terrain → sécurisation
- Adapter les actions efficaces

→ ACTUALISATION DU PCS avec nouveaux secteurs sensibles

→ Vigilance Météo renforcée

→ Nettoyer les cours d'eau aux abords des enjeux (pont, buses, maisons) → augmenter la capacité hydraulique



- Doit-on reboiser rapidement ?

- NON, INEFFICACE, voire aggravant (terrassements)
- Laisser les aiguilles de pins tomber avant exploitation (sol protégé)

- Doit-on mettre des fascines sur les versants ?

- Oui si enjeux directement sous un versant



Val de Gilly

Les risques hydrauliques induits – exemple d'analyse

Réaliser une analyse sommaire – cas d'une emprise restreinte (moins d'enjeux)

- Détermination de l'hydrologie

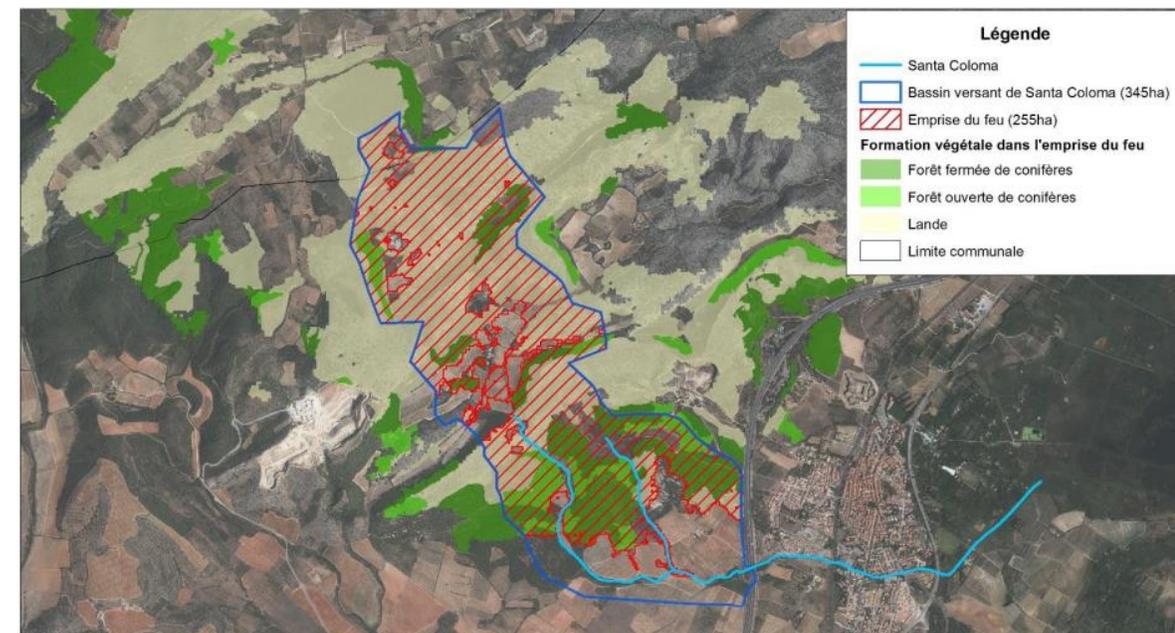
- découpage BV avec % incendié et % occupation du sol

Correc de Santa Coloma superficie = 345 ha	Avant feu		Après feu	
	Surface (ha)	Surf. brûlée (ha)	Surf. non brûlée (ha)	
Forêt fermée résineux	60	51	9	
Forêt ouverte résineux	28	23	5	
Garrigues, landes	151	141	10	
Cultures et friches	105	40	65	
Surface minérale	1	0	1	
surface totale (ha)	345	255	90	
			345	

<i>Tableau 8 : coefficients de ruissellement moyens sur le bassin versant du correc de Santa Coloma</i>	Avant incendie	Après incendie
10 ans	0,45	0,72
100 ans	0,62	0,77

Intensité pluvieuse pour période de retour **10 ans** → $i_{10\text{ans}} = 49 \text{ mm/h}$

Intensité pluvieuse pour période de retour **100 ans** → $i_{100\text{ans}} = 84 \text{ mm/h}$



<i>Tableau 9 : débits de référence du bassin versant du correc de Santa Coloma AVANT / APRES incendie</i>	Avant incendie	Après incendie	
Q_{10 ans}	21 m³/s	34 m³/s	augmentation post-incendie : + 62%
	6,1 m ³ /s par km ²	9,9 m ³ /s par km ²	
Q_{100 ans}	50 m³/s	62 m³/s	augmentation post-incendie : + 24%
	14,5 m ³ /s par km ²	18,0 m ³ /s par km ²	

Les risques hydrauliques induits – exemple d'analyse

Réaliser une analyse sommaire – cas d'une emprise restreinte (moins d'enjeux)

- Identification des secteurs problématiques

- calculs de capacité avant/après



calculs hydrauliques selon Manning-Strickler

section	type	section (m ²)	débit capable max. (m ³ /s)	Risque de débordement en dehors du lit mineur			
				Q _{10ans} avant incendie	Q _{10ans} après incendie	Q _{100ans} avant incendie	Q _{100ans} après incendie
SC1	pont cadre	12,4	36	non	non	oui	oui
SC2	section trapézoïdale	11,6	40	non	non	oui	oui
SC3	pont voûté	7	25	non	oui	oui	oui
SC4	section trapézoïdale	5,5	12	oui	oui	oui	oui
SC5	rampe de section trapézoïdale -	5,5	25	non	oui	oui	oui

- Actions préconisées

- **ACTUALISATION DU PCS** + prévoir exercice de mise en situation
- **Rabaisser les seuils du PCS pendant 3 ans**
- Intégrer des valeurs d'**intensité de pluie**

	Débit du début des désordres	Intensité pluvieuse équivalente avant incendie	Intensité pluvieuse équivalente après incendie
correc de Santa Coloma	30 m ³ /s	70 mm/h	45 mm/h
correc de Pérol	3 m ³ /s	52 mm/h	32 mm/h

Les risques hydrauliques induits – la tendance

Effets observés attribués au dérèglement climatique

- Augmentation des incendies

- sécheresses plus intenses et fréquentes → stress hydrique des végétaux → volume de combustibles important
- durées sécheresses plus longues → printemps >> automne
- extension spatiale plus large → forêts de montagne et piémont de plus en plus vulnérables

- Modification des régimes hydrologiques

- augmentation de l'intensité pluvieuse des fortes pluies
- modification des régimes climatiques locaux → la typologie de « pluie méditerranéenne » remonte dans les vallées

Conséquence sur les risques hydraulique

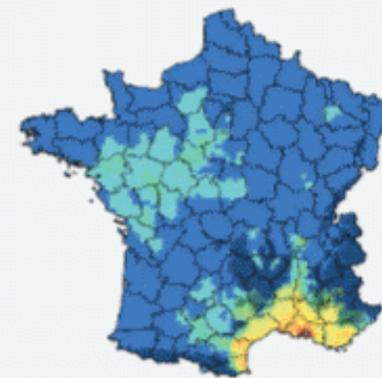
- probabilité plus importante que des pluies intenses surviennent après un incendie de végétation sur terrains pentés



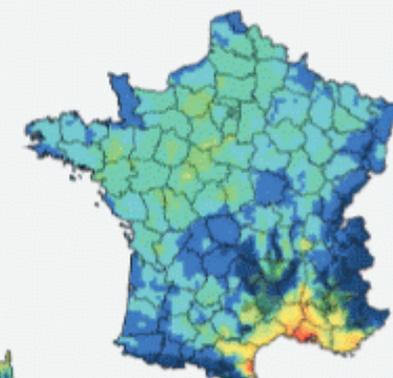
PROBLÉMATIQUE D'AGGRAVATION DES RISQUES HYDRAULIQUES DE PLUS EN PLUS PRÉOCCUPANTE À L'AVENIR

IFM : Indice de feu météorologique

Référence
1989 - 2008

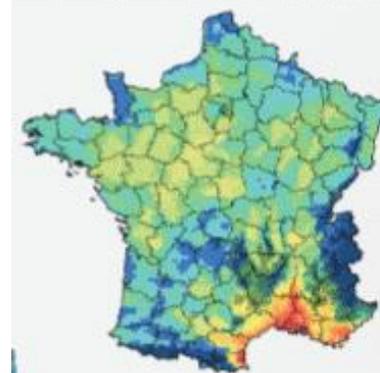


Horizon proche
2031 - 2050

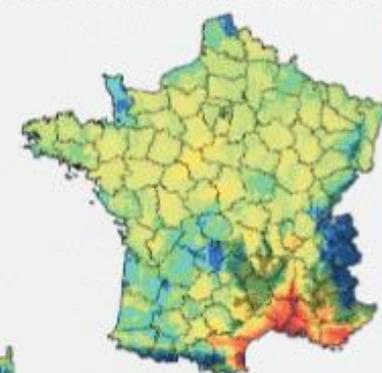


© DRIAS les futurs du climat (Météo-Fra

Horizon moyen
2051 - 2070



Horizon lointain
2081 - 2100



France, CNRM-GAME, IPSL, CERFACS)



Office National des Forêts

Merci pour votre attention.

etienne.ebrard@onf.fr

Service RTM des PYRÉNÉES-ORIENTALES

Pour aller plus loin sur le projet Montclima (impact des incendies sur l'érosion et l'augmentation du risque inondation – lien vidéo du projet) :

