

Les incendies de forêts et leurs impacts sont-ils en augmentation dans le monde ?

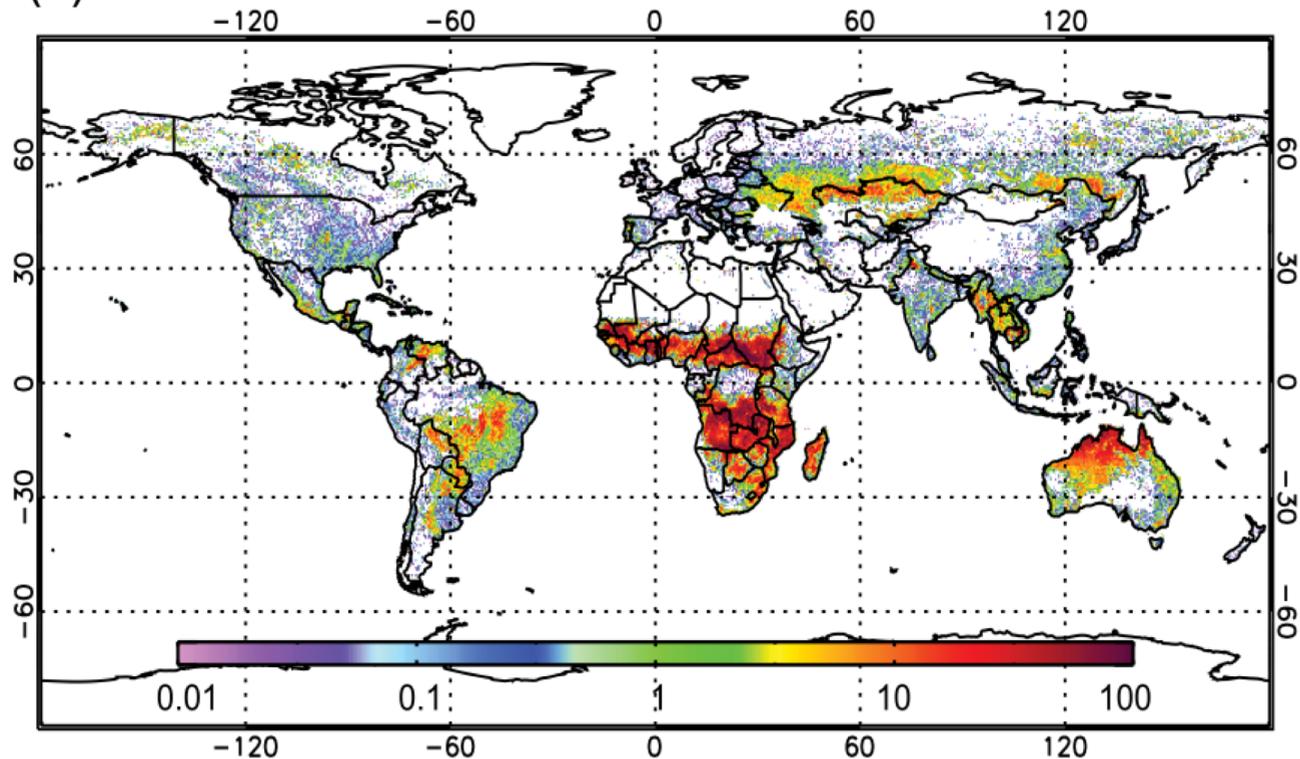
Jean-Luc DUPUY, Directeur de recherche INRAE – URFM, Avignon

Académie d'Agriculture de France
Webinaire: Incendies, Forêts et Société - Vivre avec un risque accru
10 juin 2020

Les feux de végétation dans le monde : variabilité spatiale

*La superficie brûlée annuelle (460 Mha) représente 3,5 % de la surface des terres émergées
L'immense majorité des feux ont lieu en Afrique et dans les couverts herbacés.
La fréquence des feux est extrêmement variable.*

Fraction de territoire brûlé par an (en %, maille de 0,25°, 2001-2010)

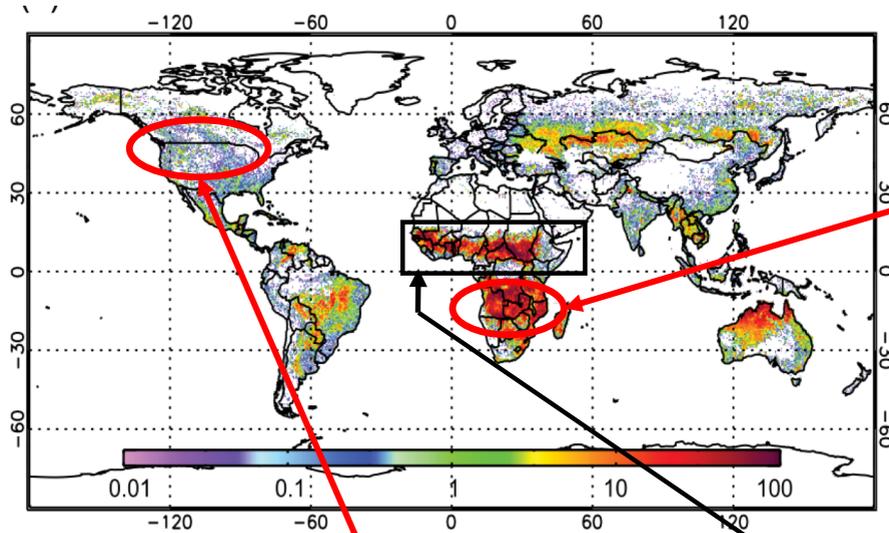


Superficie brûlée (Mha/an)	464
Afrique	323
Asie	50
Australie/ NZ	49
Amérique du sud	34
Amérique du nord et centrale	8,7
Europe	1,2

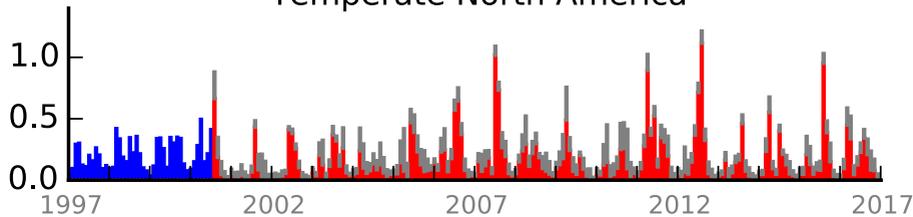
Superficie brûlée	%
Forêts	3,6
Landes arbustives	4,9
Savannes boisées	40
Savannes, steppes	42
Surfaces cultivées	4,6
Mosaïque	5,5

Estimations à partir de produits satellitaires (Randerson et al 2012, J Geophys Res. Données GFED4+petits feux)

Les feux de végétation dans le monde : variabilité temporelle



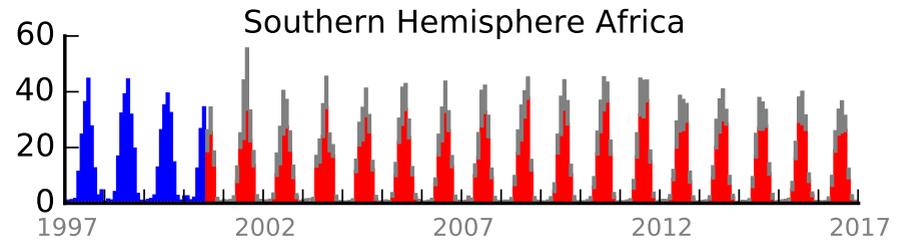
Surfaces brûlées mensuelles (Mha)
Temperate North America



Les forêts tempérées d'Amérique du nord, une activité des feux irrégulière : saisons sèches plus ou moins longue et intense, déterminées par les variations interannuelles du climat.

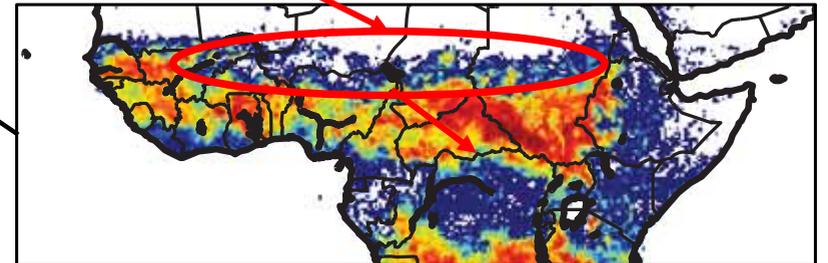
Données mensuelles GFED4 - Van der Werf et al 2017, Earth Syst Sci Data

Surfaces brûlées mensuelles (Mha)



Les savanes africaines, un optimum pour l'activité des feux : alternance régulière d'une saison humide (production de biomasse) et d'une saison sèche (dessèchement de la végétation)

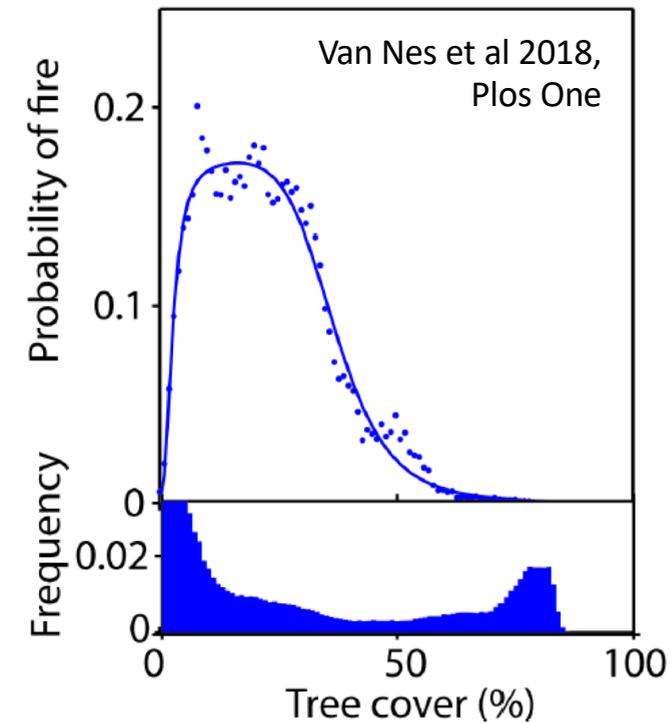
Sahel, zone semi-aride où la faible abondance de biomasse combustible limite l'activité des feux (voir Alavarado et al 2019, Glob Ecol Biog)



Les incendies de forêt dans le monde

La superficie brûlée annuelle était de l'ordre de **67 millions d'hectare** au cours des dernières décennies, dont l'immense majorité sous **climats tropical et sub-tropical**

Fréquence du feu selon le couvert d'arbres en région tropicale



Par continent

Surface brûlée	%
Afrique	35
Asie	3
Australie/ NZ	14
Amérique du sud	72
Amérique du nord et centrale	9
Europe	5

Surface brûlée/ Surface forestière	%
Afrique	2,6
Asie	0,3
Australie/ NZ	3,6
Amérique du sud	4,0
Amérique du nord et centrale	0,6
Europe	0,3

Par climat

Surface brûlée	%
Tropical	79
Sub-tropical	10
Tempéré	5
Boréal	5

Surface brûlée / Surface forestière	%
Tropical	2,9
Sub-tropical	2,2
Tempéré	0,5
Boréal	0,3

Les tendances des surfaces brûlées observées dans le monde

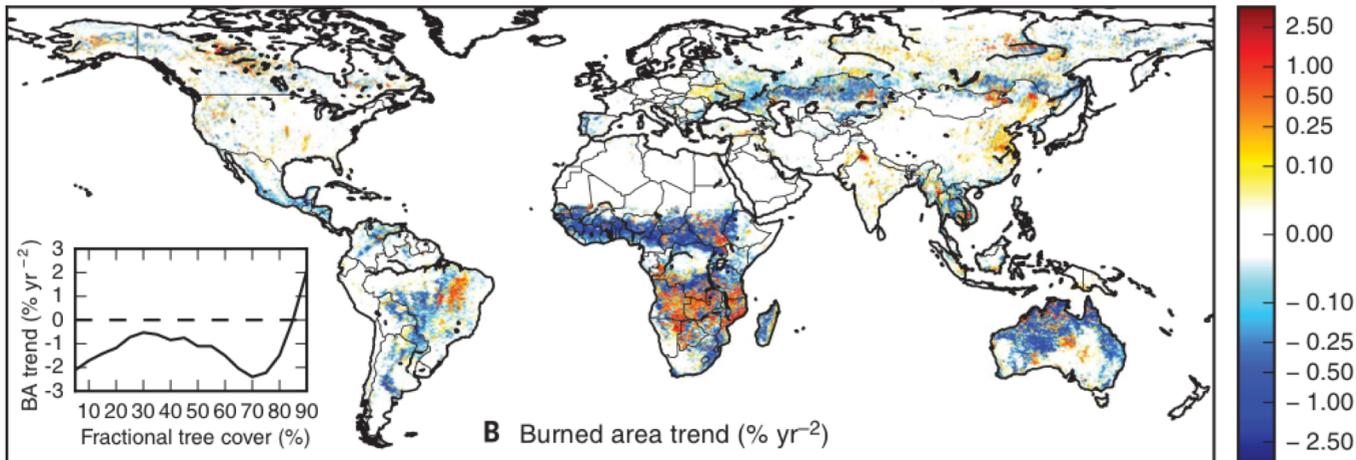
Les données satellitaires montrent *une diminution de l'ordre de 1 % par an des surfaces brûlées à l'échelle mondiale*

La tendance globale n'est pas significative, mais elle l'est dans certaines régions tropicales (Afrique - hémisphère nord, Amérique du sud) et en Asie centrale (Forkel et al 2019 Env Res Commun)

Tendances des surfaces brûlées annuelles (1998-2015)

(en % par an de la fraction annuelle brûlée)

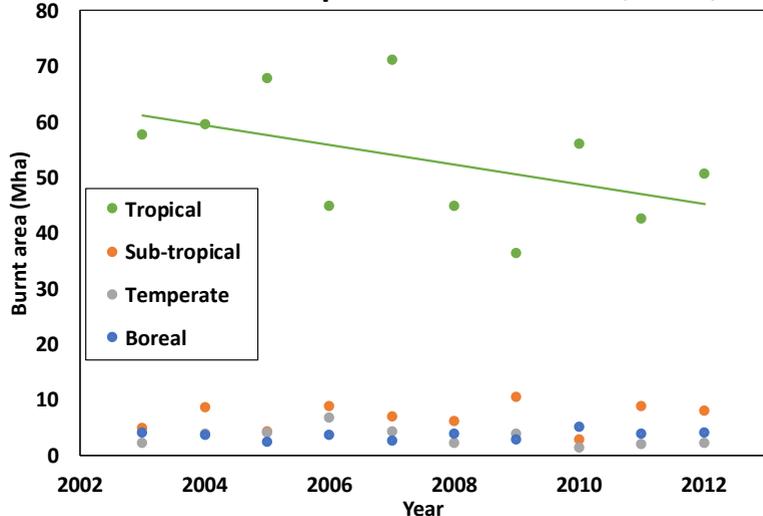
Andela et al 2017, Science. Données GFED4s



Pour les seuls feux de forêt, la surface brûlée a diminué de 3,3 % par an en zone tropicale, 2,9% sous tous les climats (2003-2012), On n'observe aucune tendance sous les autres climats (sur 10 ans).

Forest Resource Assessment (FRA), 2015. (Van Lierop et al 2015, For Ecol Manag)

Surfaces brûlées par les feux de forêt, Mha/an



Les déterminants de l'activité des feux et des évolutions à l'échelle mondiale

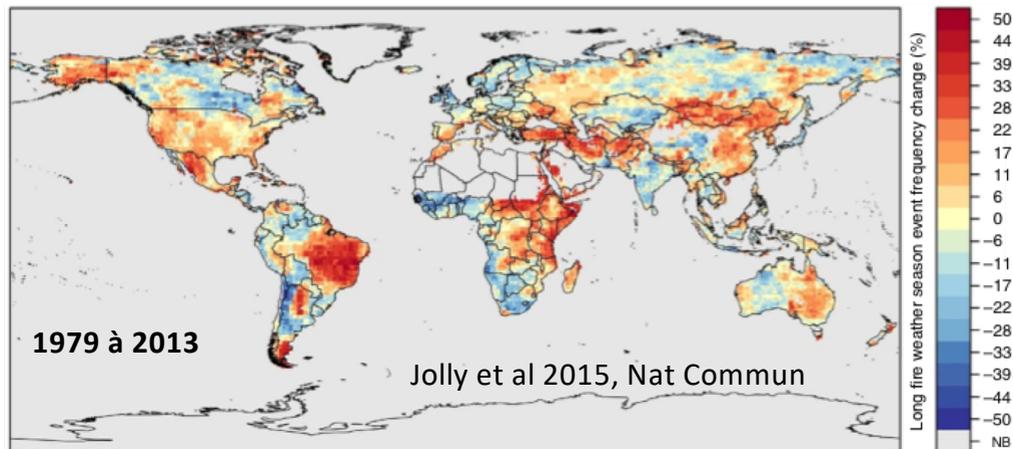
La population et l'agriculture influencent les surfaces brûlées, avec des directions et une ampleur variables selon les régions, en interaction avec les effets du réchauffement climatique.

Les corrélations spatiales sont positives quand le couvert forestier est important, elles peuvent devenir négatives dans les savanes et steppes.

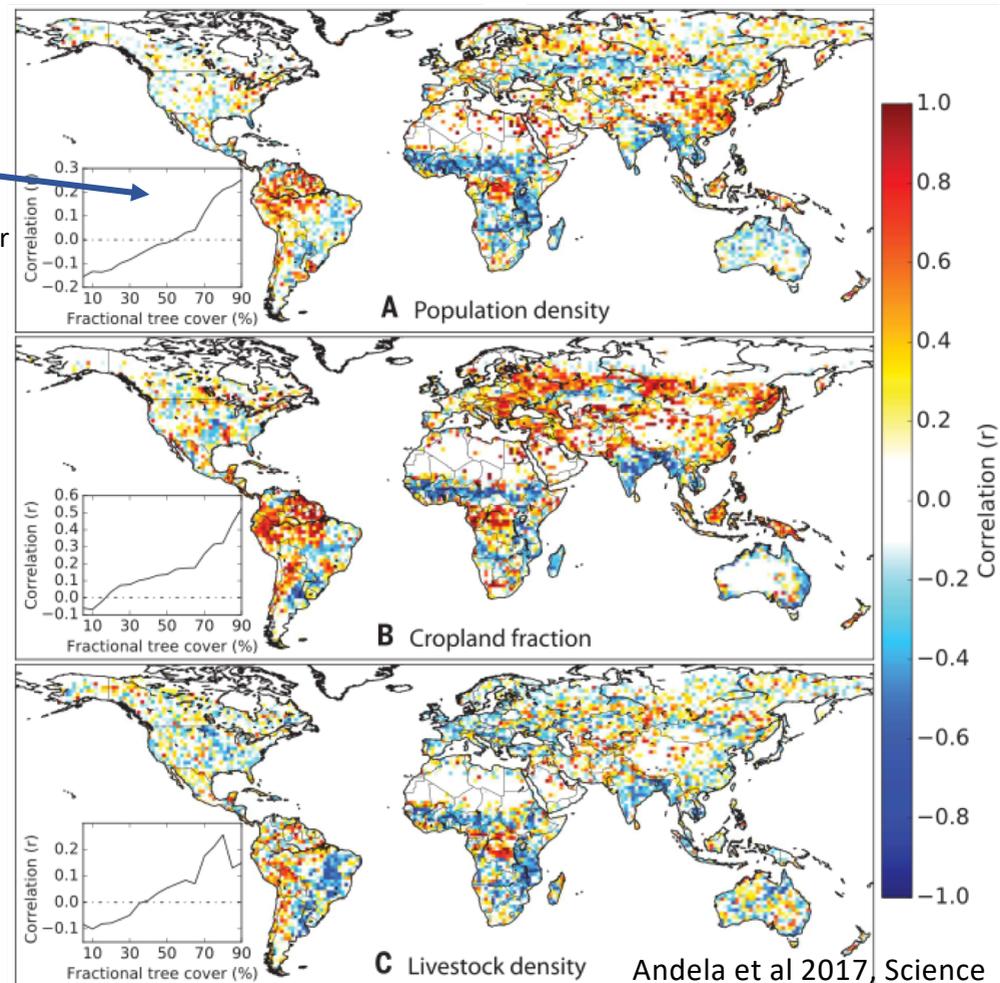
Les processus expliquant ces corrélations :

- utilisation du feu versus mécanisation en agriculture
- protection contre le feu, dans les régions riches
- réduction de la biomasse combustible par le pâturage
- déforestation

Changements (%) dans la fréquence des saisons de feu longues



Corrélations spatiales entre surfaces brûlées et population, couvert agricole et pâturage, dans chaque unité spatiale (1.5°)



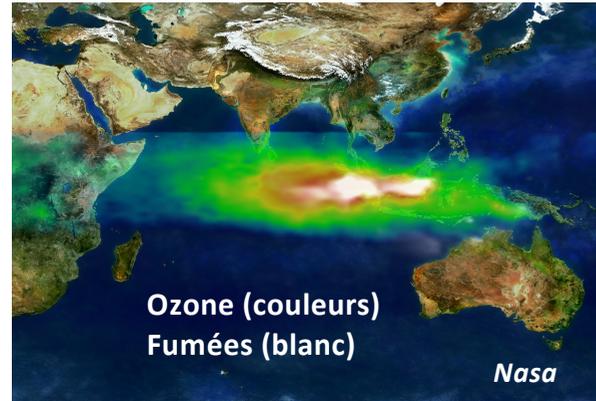
Les impacts des feux de forêt

Les feux consomment une partie de la végétation (le combustible) libérant soudainement la matière et l'énergie accumulées via la photosynthèse, avec des effets sur l'atmosphère et les sols et sur les biens et les personnes.

Panache, feux du 15 octobre 2017, Portugal



Feux de tourbe, Indonésie, 1997



Surface brûlée à l'interface forêt-habitat, France



Patrons de végétation post-incendie, Portugal



Glissements de terrain et coulées de boue post-incendie, Californie, 2018



Protection des sols après un incendie, Forêt de sapin de Céphalonie, Grèce, 2007



Les émissions de carbone des feux de végétation

Les émissions annuelles sont du même ordre que la séquestration par les écosystèmes terrestres.
Les feux de forêts représentent de l'ordre de 30 % des émissions ("Forest + Woodland fires")

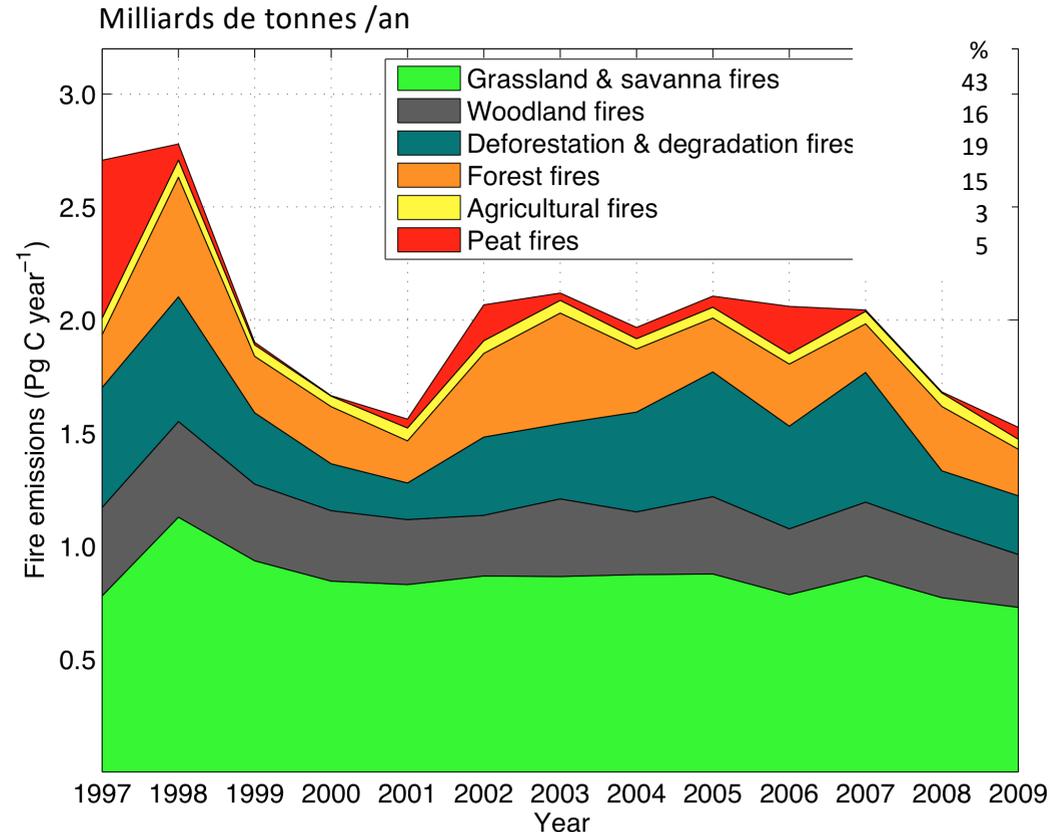
Milliards de tonnes / an

Emissions de carbone	2,54
Afrique	1,29
Asie	0,53
Australie /NZ	0,13
Amérique du sud	0,44
Amérique du nord et centrale	0,13
Europe	0,003

Randerson et al 2012 J Geophys Res
 (inclut les petits feux)

Flux de carbone de référence	
Production primaire (terrestre)	17,0
Séquestration (terrestre)	3,6
Emissions fossiles	8,9

Keenan et al 2018 Annu. Rev. Environ. Resour.



Van der Werf et al 2010 Atmos Chem Phys
 (surfaces brûlées détectables avec MODIS)

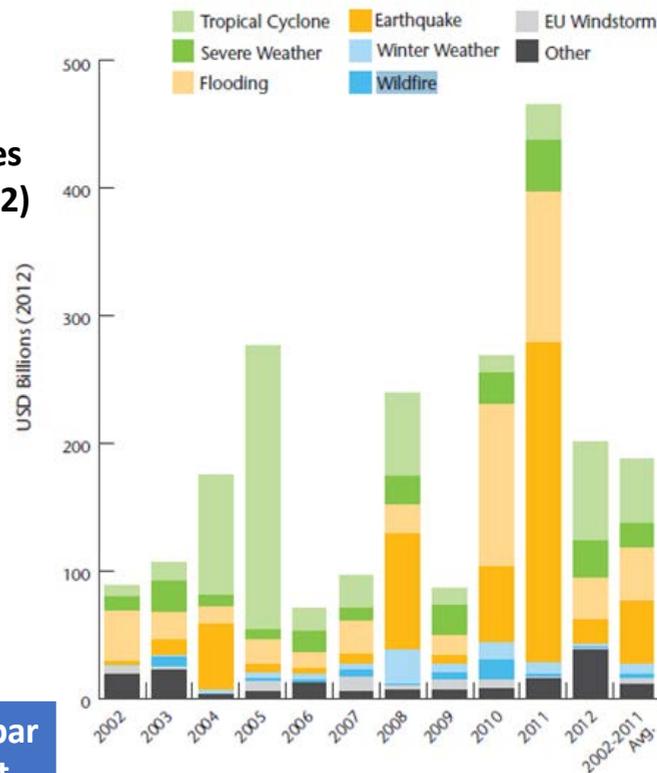
Les impacts socio-économiques des feux catastrophiques

Les pertes sont faibles en comparaison des autres catastrophes naturelles à l'échelle mondiale.

Elles sont néanmoins très élevées en Amérique du Nord, Europe et Australie.

Les impacts sur la santé (fumées) sont difficiles à estimer, mais considérables (ex. Russie 2009, Indonésie 1997)

Pertes économiques liées aux catastrophes naturelles (2002-2012)
(source: Lloyd's report, 2013)



Pertes en vies humaines et pertes économiques dues aux feux catastrophiques de 1990 à 2019 à l'échelle mondiale

Période	Nombre d'évènements	Décès	Dommages (millions \$ par an)	Nombre de décès par évènement	Dommages par évènement (millions €)
1990-1999	103	859	1913	8	186
2000-2009	142	629	2244	4	158
2010-2019	96	856	8792	9	916

Source EM-DAT 2020

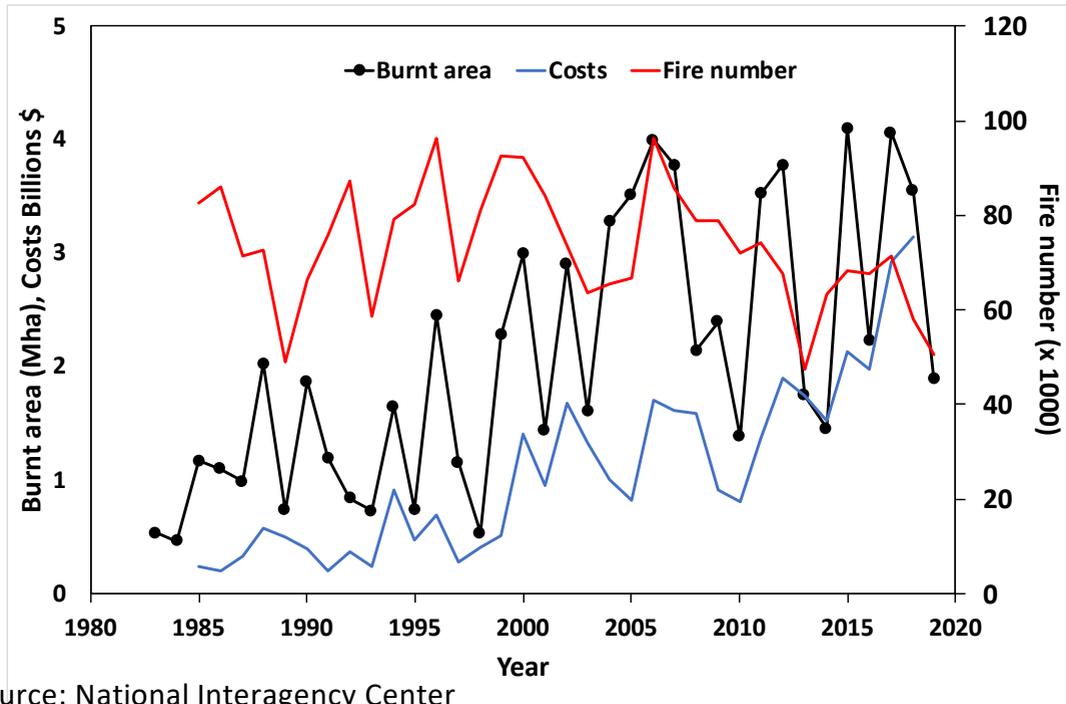
Les tendances observées aux Etats-Unis

Les surfaces brûlées sont *en augmentation nette* depuis 40 ans.

Deux facteurs d'explication sont avancés :

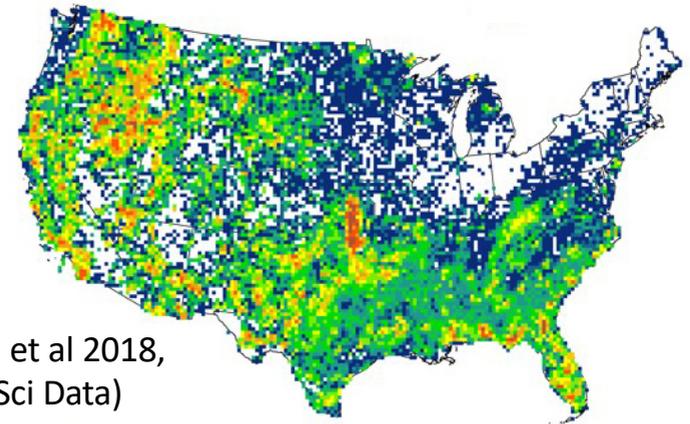
- variations et réchauffement climatiques
- accumulation de biomasse combustible succédant à une politique d'éradication des feux

Nombre de feux, surfaces brûlées et coûts de la lutte de 1983 à 2019

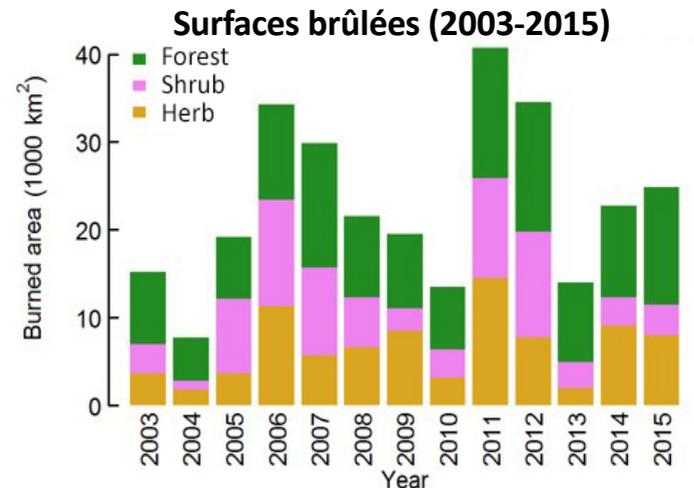


Source: National Interagency Center

Fraction de territoire brûlée (% par an, 2003-2015)



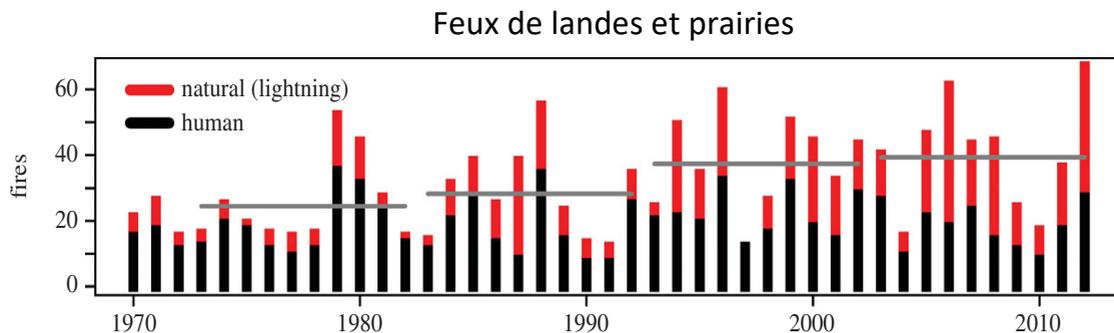
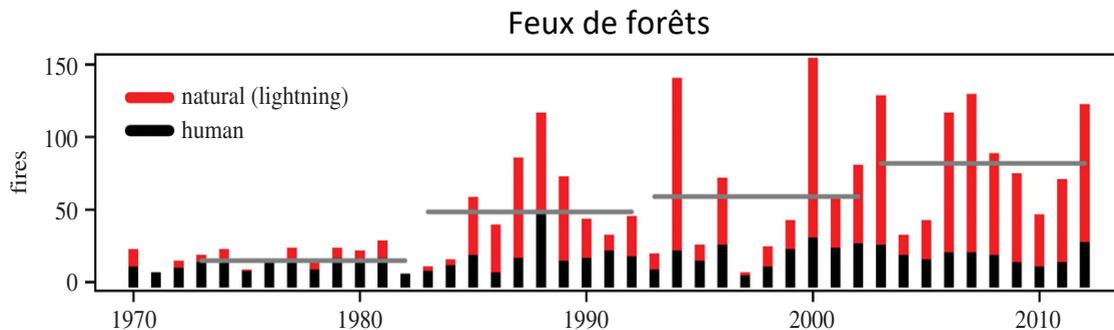
(Urbanski et al 2018, Earth Syst Sci Data)



Les tendances observées aux Etats-Unis

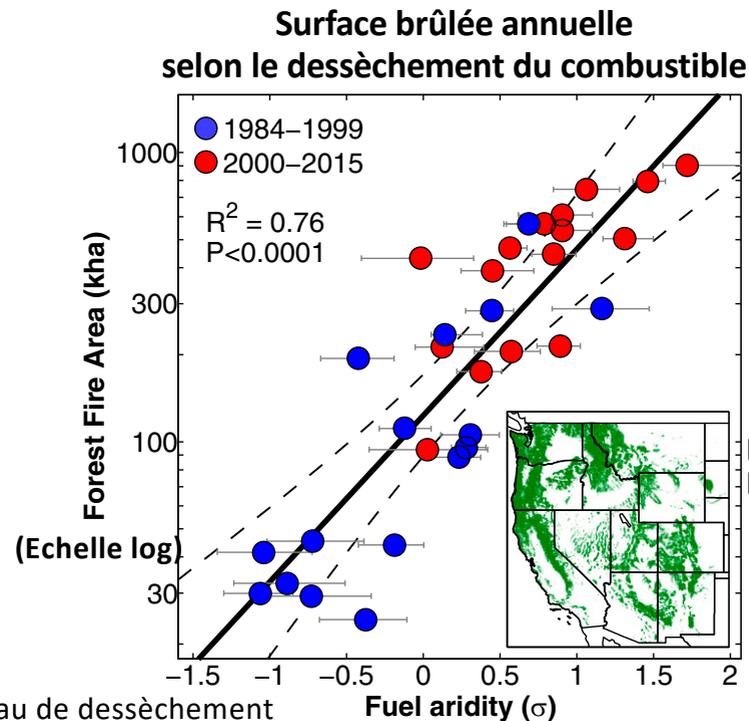
Une analyse des feux de l'Ouest des Etats-Unis montre un fort accroissement du nombre de grands feux, allumés par la foudre, et associés à un printemps (fonte des neiges) et un été plus précoces (déficit hydrique).

Evolution du nombre de grands feux (> 400 ha) de 1970 à 2012



Westerling 2016, Phil Trans R Soc

Le dessèchement du combustible explique largement les variations de surface brûlée. La relation est exponentielle.



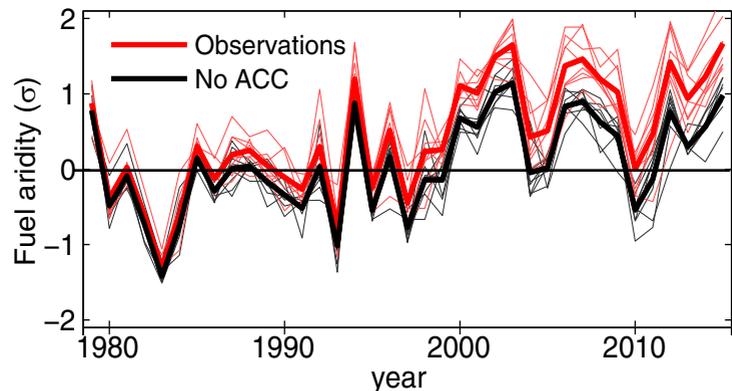
Abatzoglou et Williams 2016, PNAS

pour les forêts de l'Ouest américain

Les tendances observées aux Etats-Unis

Une augmentation des conditions favorables aux feux depuis ~2000 ...

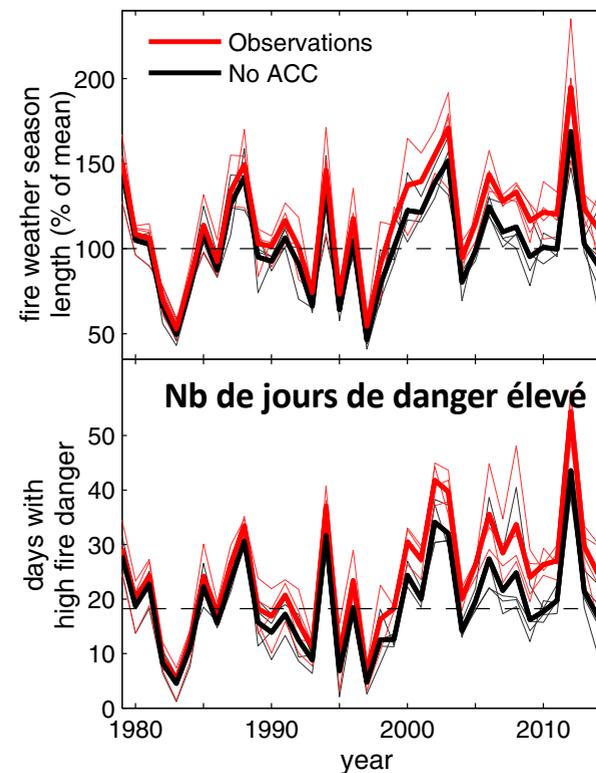
Evolution du dessèchement du combustible forestier



Abatzoglou et Williams
2016, PNAS

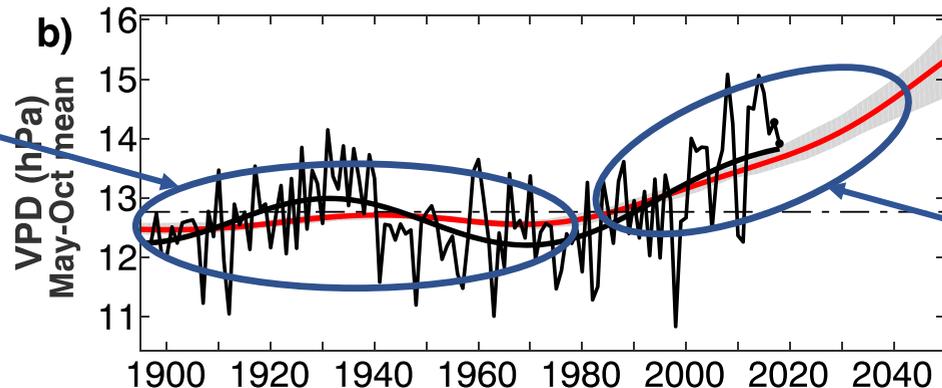
Les courbes en noir
montrent l'évolution qui
aurait eu lieu sans
changement climatique
d'origine anthropogénique
(modèle)

Durée de la saison de feu



.... d'origine majoritairement (>50%) anthropique.

Déficit de pression de vapeur d'eau de l'atmosphère (Californie)



Oscillation
naturelle

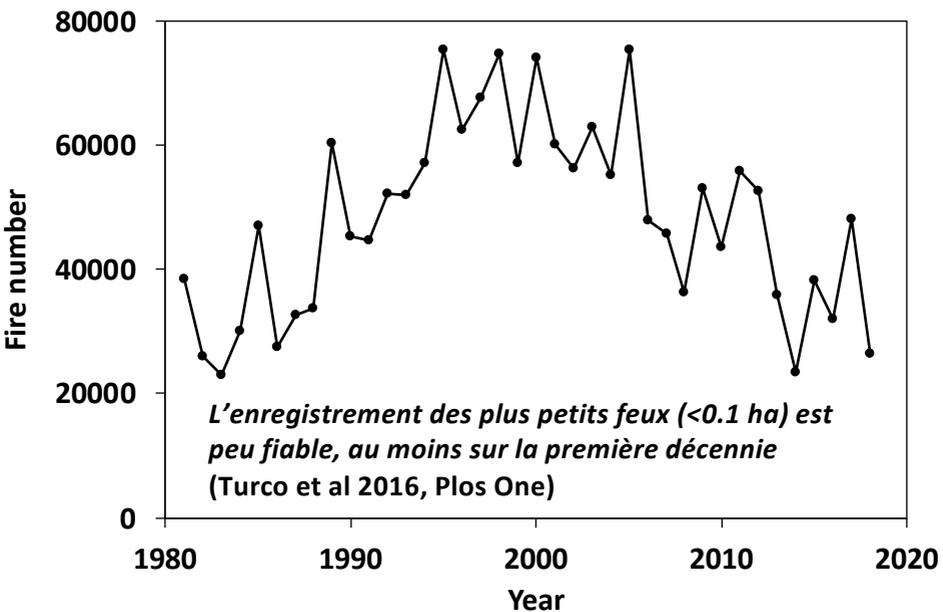
Réchauffement
anthropogénique +
variabilité naturelle

Les tendances observées en Europe du sud

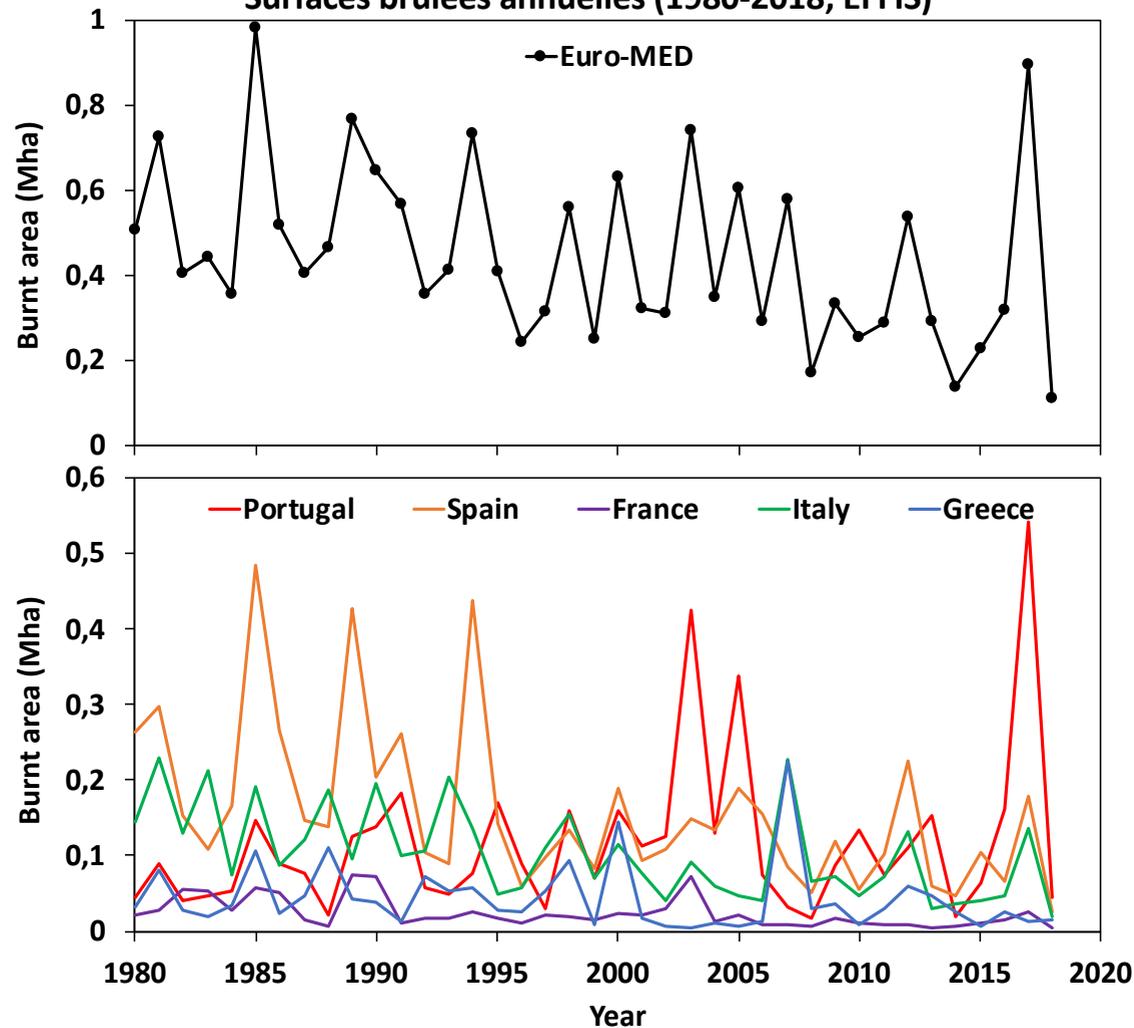
Les surfaces brûlées ont diminué depuis 40 ans dans tous les pays, à l'exception du Portugal.

Le nombre de feux a diminué depuis 2000.

Nombre total de feux enregistrés (1980-2018; EFFIS)



Surfaces brûlées annuelles (1980-2018; EFFIS)



Les tendances observées en Europe du sud

Turco et al (2016) analysent les tendances pour le nombre de feux (> 1ha) et les surfaces brûlées par des méthodes robustes

La diminution est avérée à l'exception du Portugal, et de la Grèce pour le nombre de feux.

par des bases

Tendances pour la surface brûlée en % de la valeur moyenne par unité administrative (1985-2011)

Cercle plein : tendance significative ($p < 0.05$)



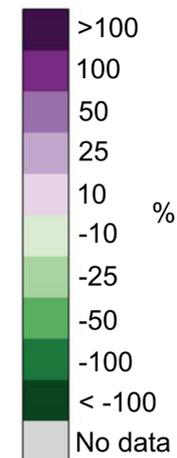
Tendances en % de la valeur moyenne (1985-2011)

Pays	Nombre de feux (> 1ha)	Surface brûlée
Portugal	+8	-4
Espagne	-39**	-86***
France	-89***	-73**
Italie	-101***	-78***
Grèce	+3	-91**

* $p < 0.10$.

** $p < 0.05$.

*** $p < 0.01$.



Données EFFIS complétées/corrigées par des bases nationales ou régionales indépendantes

Turco et al (2016), Plos One

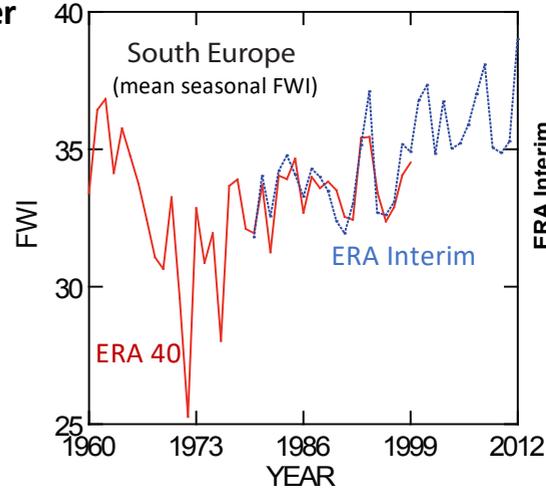
Les tendances observées en Europe du sud

Le danger météorologique est stable ou a augmenté

Evolution du danger saisonnier (Mars-Sept.) de 1960 à 2012 en Europe du sud

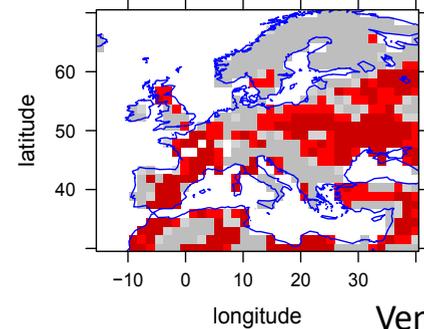
ERA 40 et ERA Interim sont deux ré-analyses du climat observé.

Venäläinen et al 2014, Nat Hazards Earth Syst sci



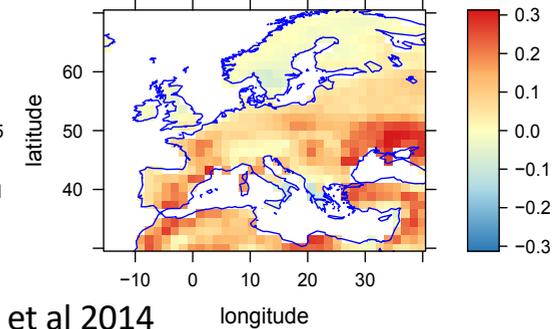
Tendances du danger météorologique de 1980 à 2012 (été)

Trend significance (p-value)



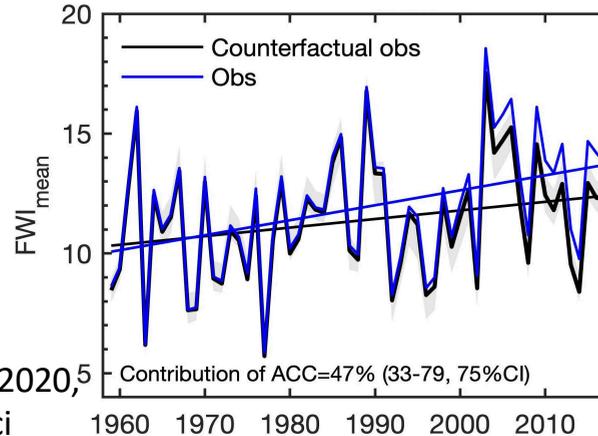
Venäläinen et al 2014

Slope (FWI unit/year)



Evolution du danger saisonnier

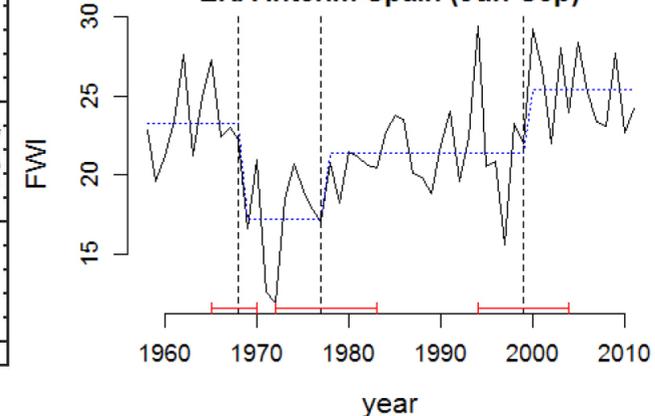
France (1960-2017; mai-sept)



Barbero et al 2020,⁵ Front Earth Sci

Espagne (1960-2012)

ERA Interim Spain (Jun-Sep)



L'indice de danger météo (FWI) journalier traduit l'effet du vent et de la teneur en eau du combustible sur l'intensité du feu.

La teneur en eau répond aux conditions météo du jour à la saison (3 échelles temporelles).

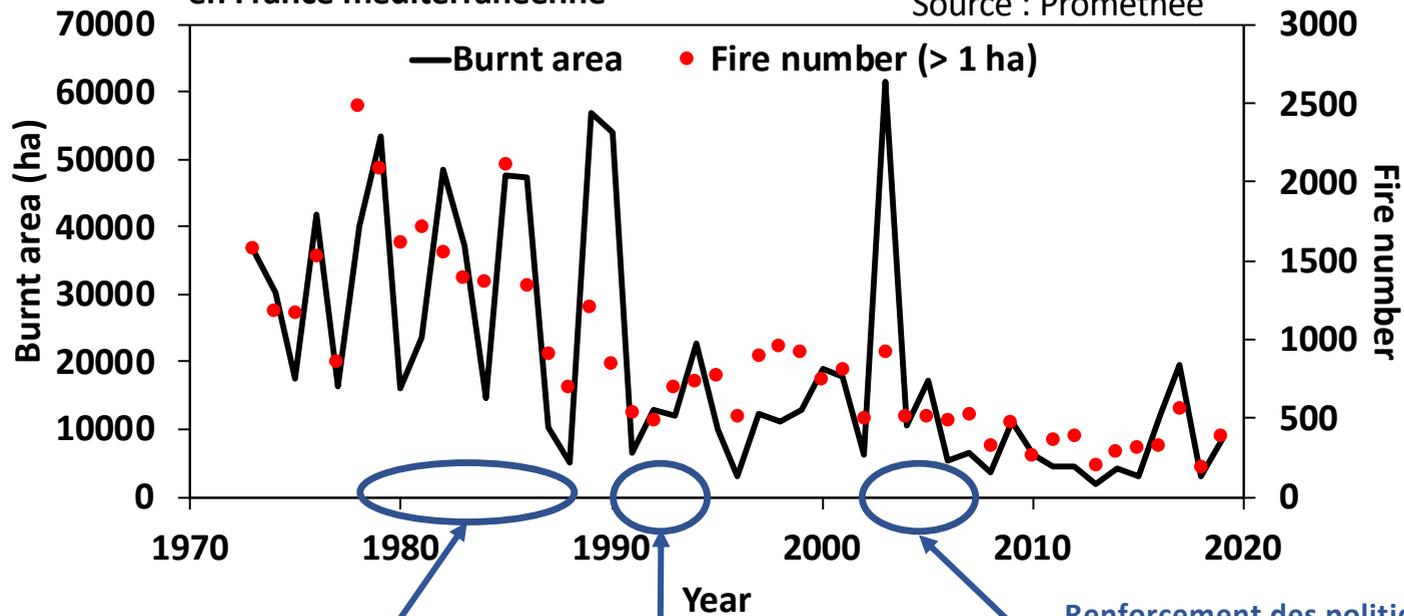
Le danger saisonnier est une statistique calculée sur la saison à partir des valeurs du danger journalier.

Les tendances observées en Europe méditerranéenne

**La diminution de l'activité des feux succède à un renforcement des politiques et moyens de lutte :
exemple de la France méditerranéenne**

Evolution des surfaces brûlées et du nombre de feux > 1ha de 1973 à 2019
en France méditerranéenne

Source : Prométhée

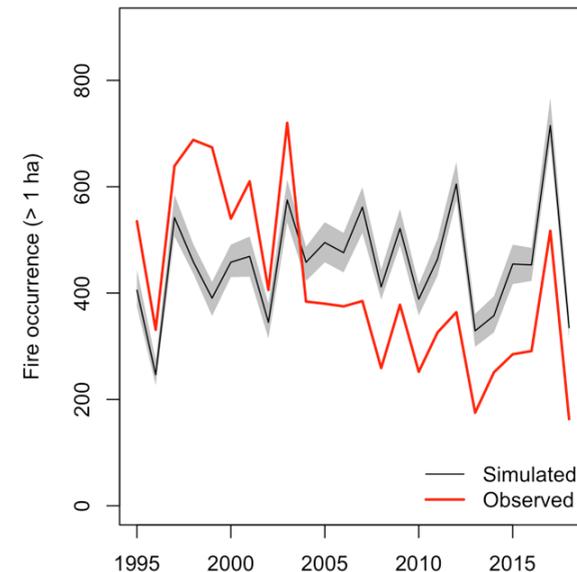


Définition et mise en place
de la politique de prévention
et de lutte

Stabilisation de la doctrine
d'attaque des feux naissant

Renforcement des politiques de
prévention et lutte, post -2003 ?
Professionnalisation ?

Une baisse significative des
feux de taille > 1 ha après 2003



En gris, simulations d'un modèle d'occurrence
des feux sans effet "année 2003".

Fargeon 2019, thèse de doctorat
Pimont et al 2020, BioRxiv

Les coûts de la prévention (1/4) et de la lutte (3/4) sont estimés à 500 millions d'euros par an.

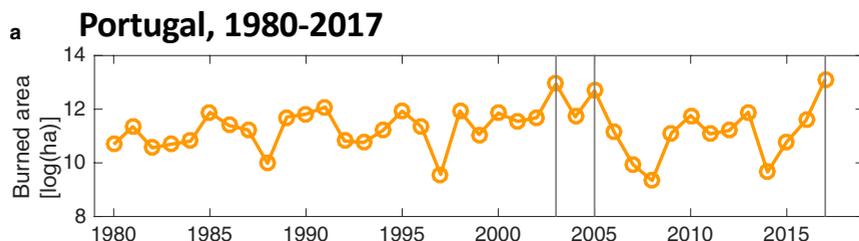
Chatry et al (2010), rapport interministériel

Les tendances observées en Europe méditerranéenne

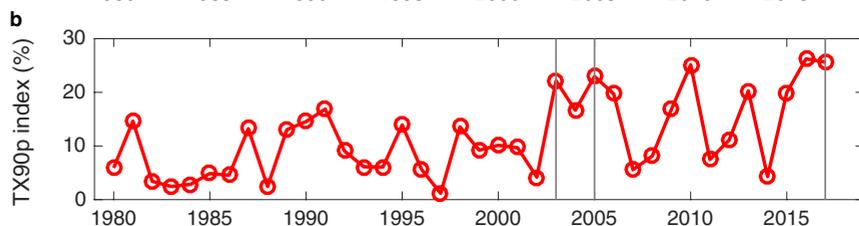
Les grands feux récents sont associés à des vagues de chaleur, et éventuellement à une sécheresse extrême (Turco et al 2019) .

L'abondance et la continuité du combustible sont un facteur aggravant, voire déterminant de la taille des feux dans certaines études (Fernandes et al 2016, Ecosyst).

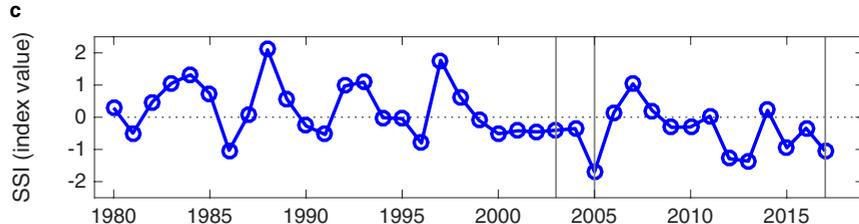
Surface brûlée
(échelle log(ha))



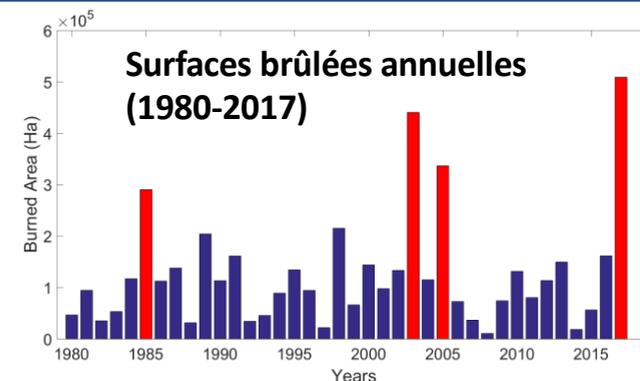
Fréquence
des jours
anormalement
chauds (%)



Indice d'humidité
du sol



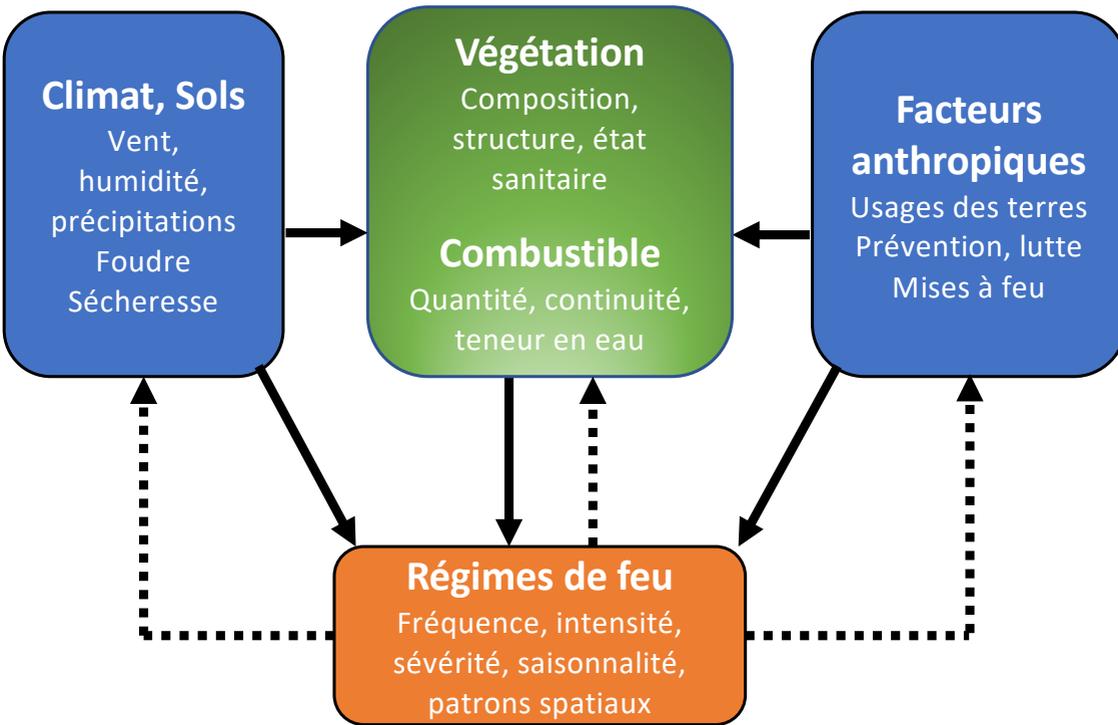
Turco et al 2019,
Scientific Rep



Ricardo Trigo,
2018

Comment quantifier les évolutions futures ?

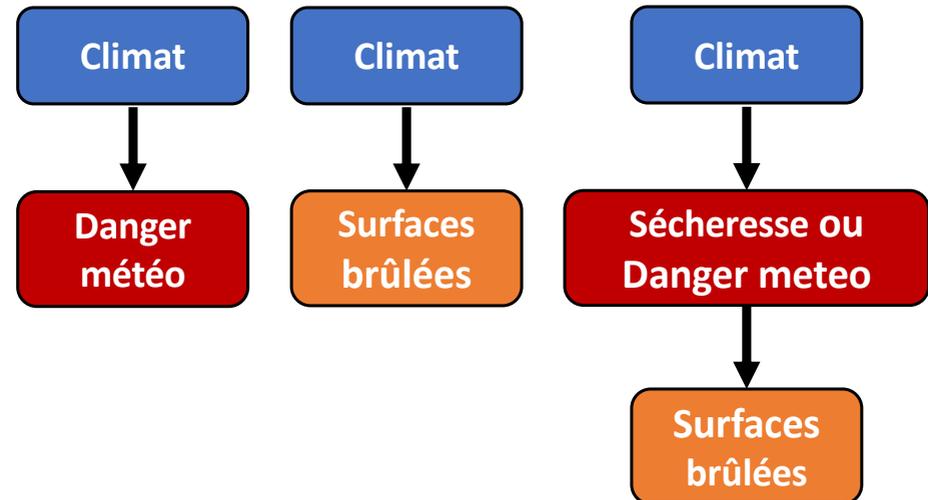
Des modèles du système feu-végétation existent, mais comportent de nombreuses limitations



.....▶ Impacts du feu (rétroaction)

La plupart des projections se limitent à l'impact du réchauffement climatique sur :

- *le danger météorologique d'incendie*
- *les surfaces brûlées via des corrélations*



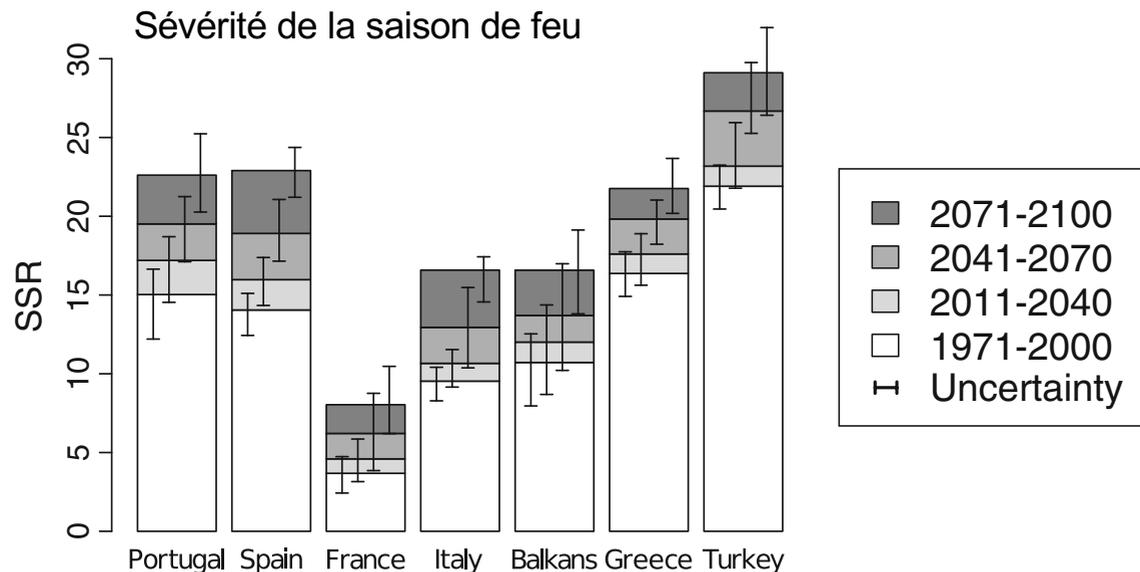
Les évolutions futures projetées en Europe du sud

Une revue de 23 études scientifiques projetant le danger ou les surfaces brûlées futures sous différents scénarios climatiques conclut à une augmentation :

- **de 2 à 4% par décennie du danger météorologique saisonnier**
- **de 15 à 25% par décennie des surfaces brûlées, soit un facteur de l'ordre de 3 à la fin du siècle.**

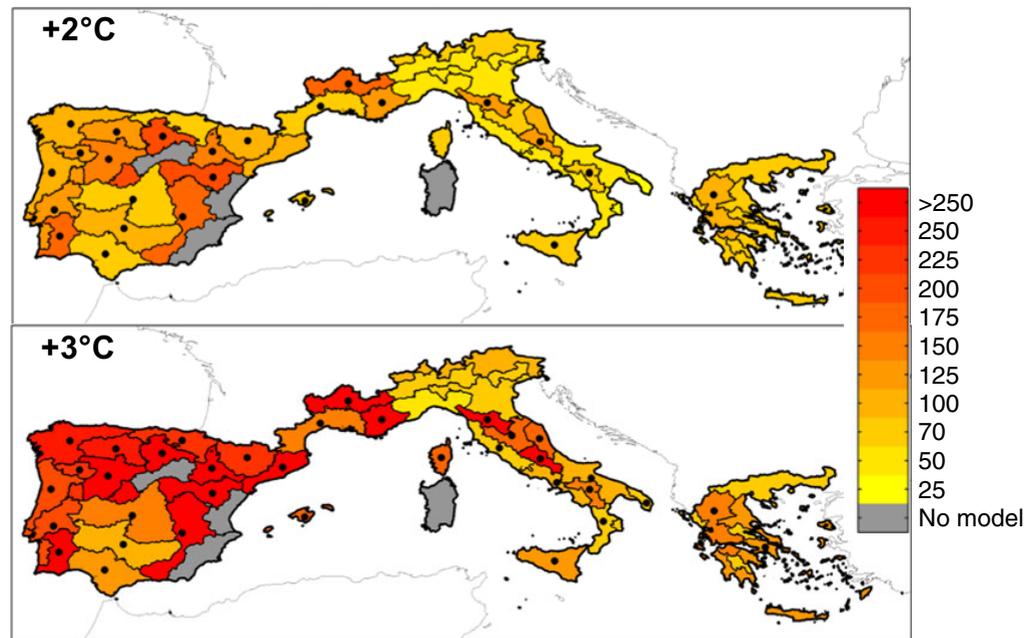
selon les modèles utilisés et les régions. (Dupuy et al 2020, Ann For Sci)

Augmentation du danger météorologique (Bedia et al 2014, Clim Change)



SSR, métrique cumulant le danger météorologique, de Juin à Sept.

Augmentation des surfaces brûlées (%) selon le niveau de réchauffement global (Turco et al 2018, Nat Commun)



Modèles empiriques de corrélation sécheresse – surface brûlée

Les évolutions futures projetées en France

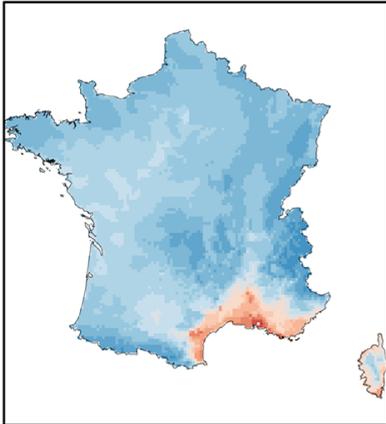
L'augmentation du danger dans le sud et à l'ouest est confirmée (cf Chatry et al 2010, Bedia et al 2014).

L'augmentation est importante et assez certaine dans le sud-est. Son ampleur est plus incertaine à l'ouest.

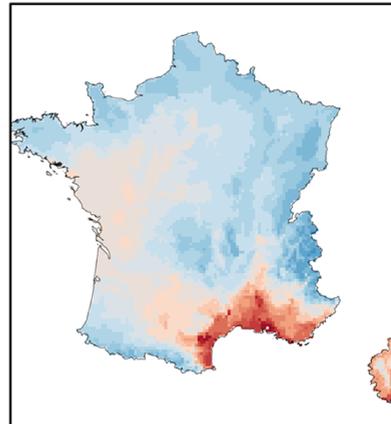
La tendance émerge de la variabilité naturelle en 2060 (RCP8.5)

Evolution du danger saisonnier (FWI) entre 1995-2015 et 2078-2098 (5 modèles)

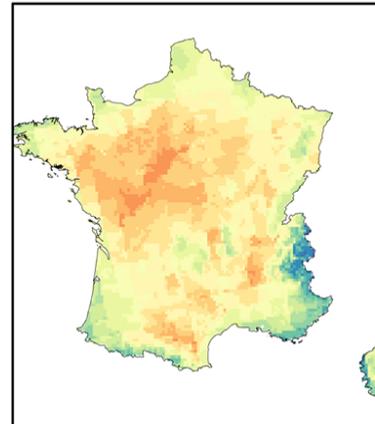
Multimodel mean
1995-2015



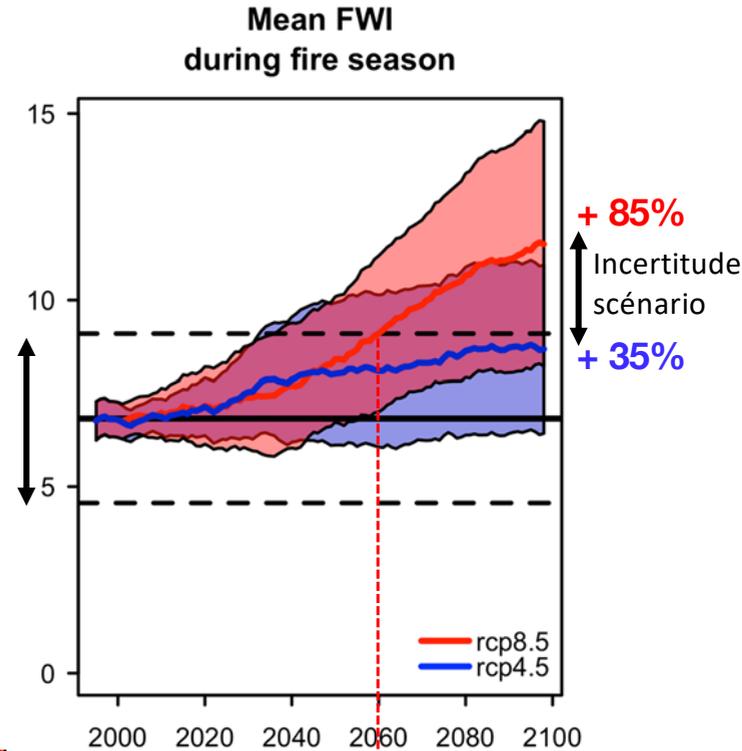
Multimodel mean rcp8.5
2078-2098



Model uncertainty
(standard deviation)



Variabilité naturelle du climat



Emergence du signal (RCP 8.5)

Fargeon2019, thèse de doctorat
Fargeon et al 2020, Clim Change

Les évolutions futures projetées en France

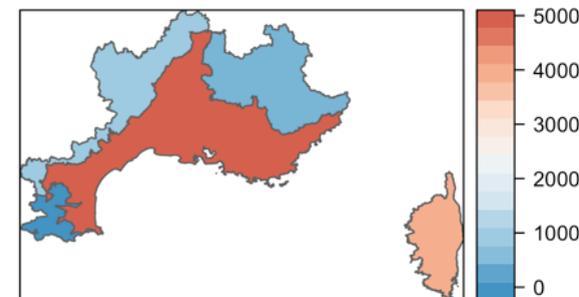
Un modèle probabiliste permet de simuler les occurrences et les tailles de feu à l'échelle du jour et de chaque pixel de 8 km de la zone Prométhée (base de données des feux du Sud-Est)

$$\text{Activité des feux} = f(\text{Surface forestière}) * g(\text{Danger météo, FWI}) * h(\text{Semaine}) * i(\text{Pixel})$$

Fargeon2019,
thèse de doctorat

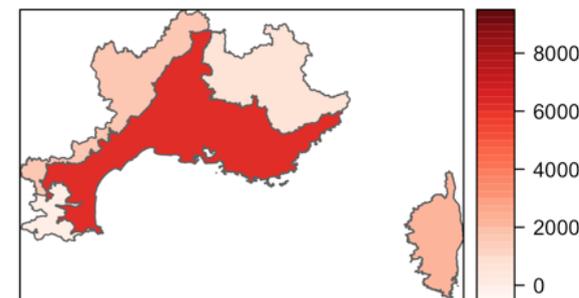
Métrique	Historique (1986-2015)	Futur (rcp8.5) (2066-2095)	Accroissement (%) Mod. moyen (min-max)
Danger saisonnier (FWI)	11.2	16.8	50 (37-59)
Nombre de feux > 1 ha (/an)	212	393	85 (33-112)
Surface brûlée (/an)	6182	15597	152 (48-202)
Taille moyenne des feux (ha)	29	40	36 (12-42)

Surface brûlée par GRECO (ha/an)



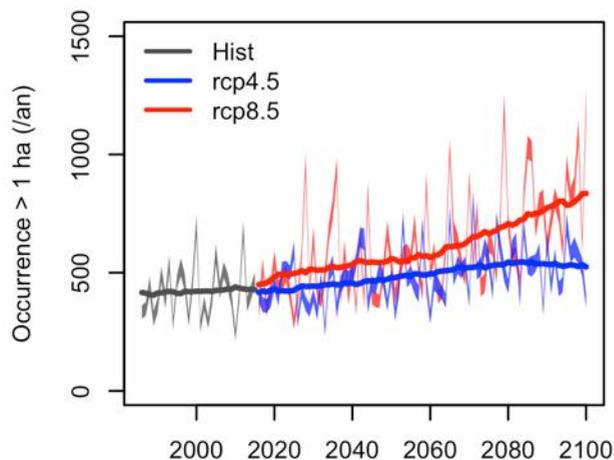
Prométhée 1995-2015

Anomalie projetée (ha/an)

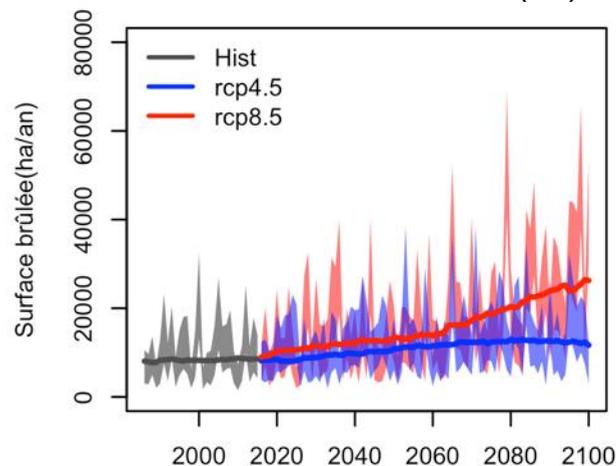


MPI REMO run1 rcp8.5

Nombre annuel de feux > 1 ha



Surface brûlée annuelle (ha)



Les incendies de forêt sont-ils en augmentation dans le monde ?

Les mécanismes des évolutions observées sont souvent difficiles à démêler et changent dans le temps et dans l'espace.

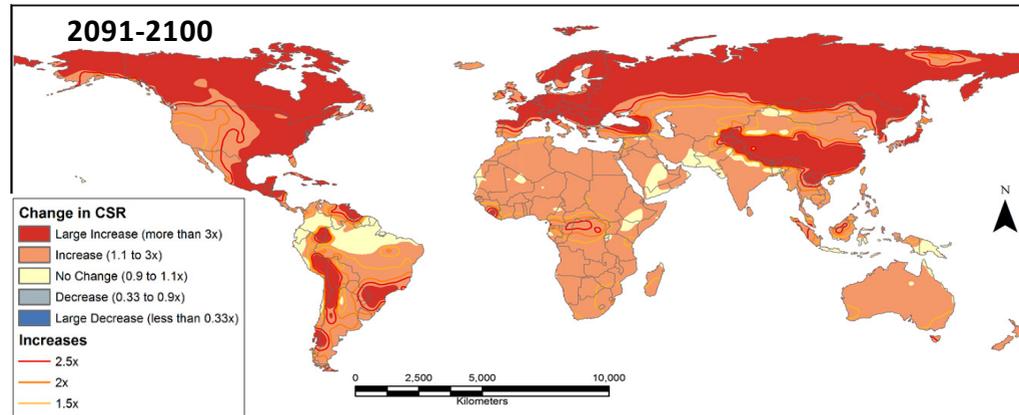
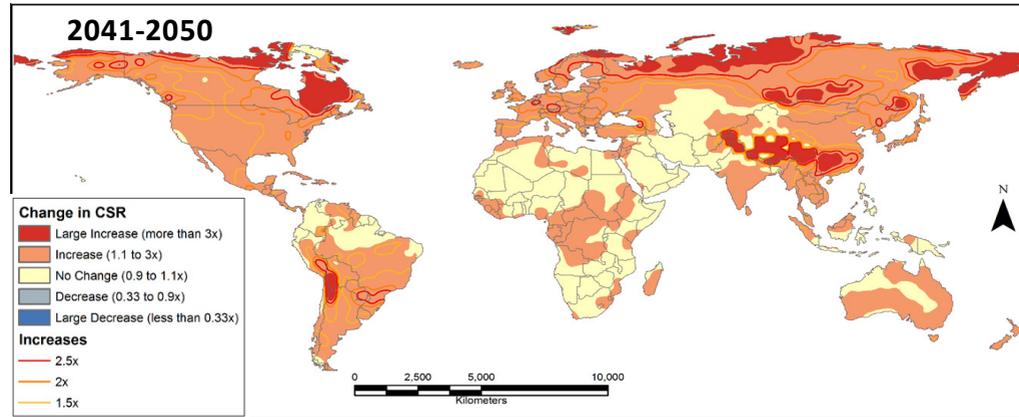
En résumé :

- *La superficie globale parcourue par les feux et leurs émissions de carbone évoluent peu.*
- *En région tropicale, les surfaces brûlées ont récemment diminué sous l'effet de facteurs anthropiques.*
- *Aux Etats-Unis, les variations climatiques et le réchauffement d'origine anthropogénique ont conduit à des conditions plus favorables au feu, entraînant une nette augmentation des surfaces brûlées sur 40 ans.*
- *En Europe du sud et en France, les surfaces brûlées ont tendance à diminuer sous l'effet des politiques de prévention et de lutte, malgré des conditions météorologiques plus favorables aux feux.*
- *L'exception du Portugal, et ses feux dévastateurs de 2017, ainsi que l'exemple des Etats-Unis, posent la question des limites de ces politiques dans les conditions extrêmes à venir, associant par exemple vague de chaleur et sécheresse.*

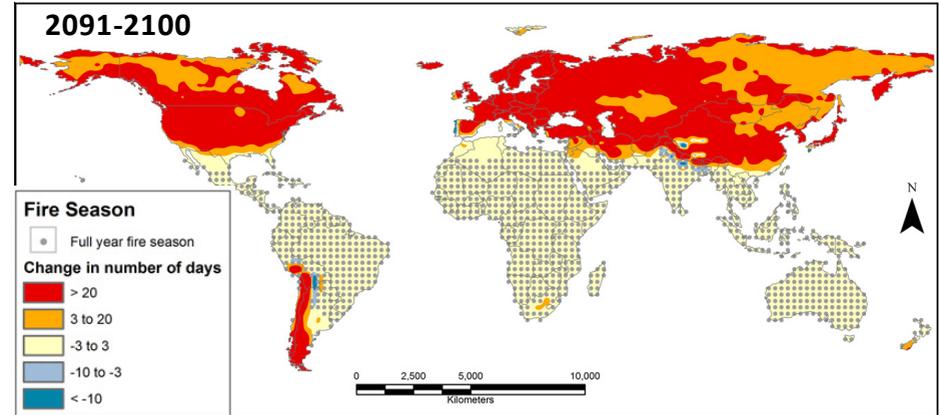
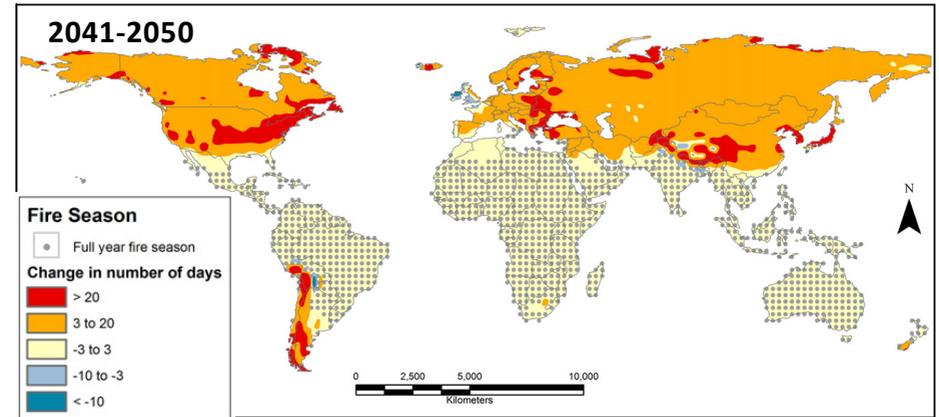
Suppléments

L'évolution du danger météorologique à l'échelle mondiale

Evolution de la sévérité de la saison de feu (CSR) par rapport à la période 1971-2000 (scénario A2, IPSL-CM4)



Evolution de la durée de la saison de feu (jours) par rapport à la période 1971-2000 (scénario A2, IPSL-CM4)

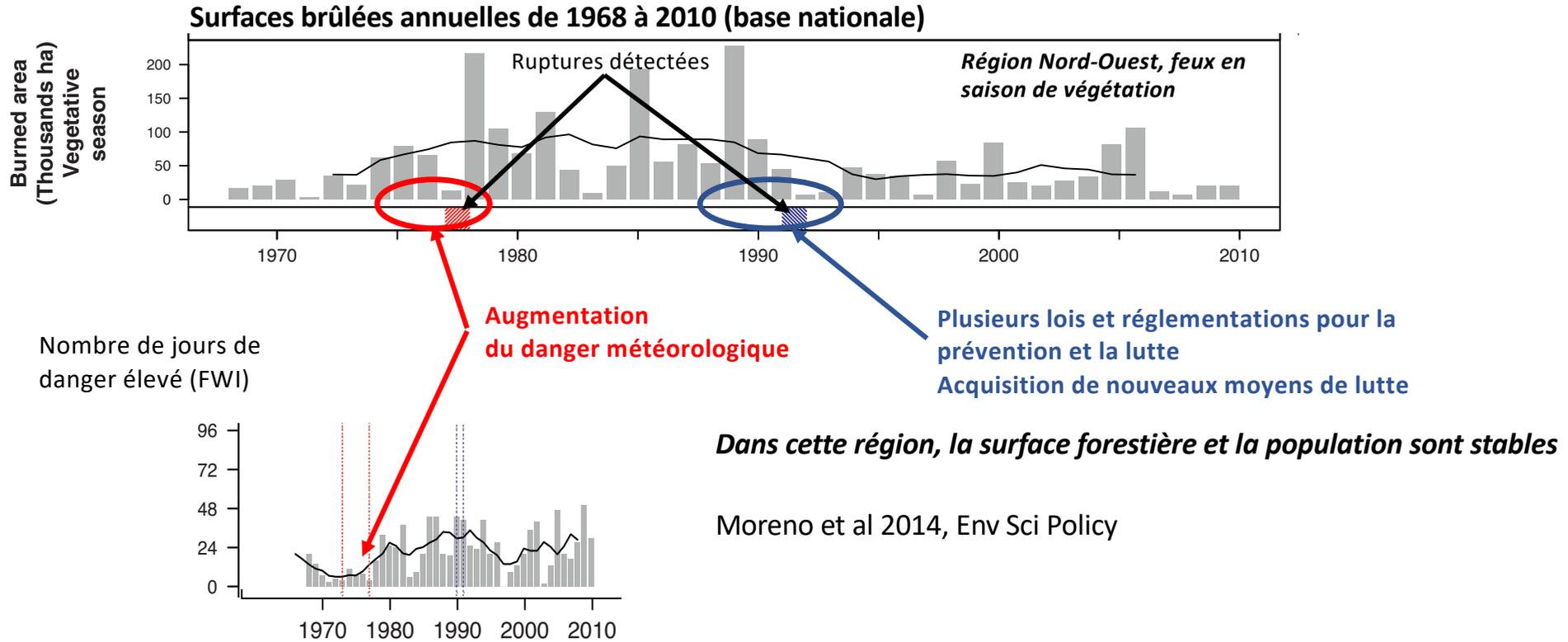


La sévérité de la saison de feu est évaluée par un indicateur (CSR) cumulant le danger météorologique sur la saison.
L'accord des différents modèles (ici IPSL-CM4) est bon

Flannigan et al 2013,
Forest Ecol Manag

Les tendances observées en Europe méditerranéenne

La diminution de l'activité des feux succède à un renforcement des politiques et moyens de lutte : exemple de l'Espagne



Les impacts socio-économiques des feux catastrophiques en Europe

Pertes en vies humaines et pertes économiques dues aux feux catastrophiques en Europe de 1990 à 2019

Période	Nombre d'évènements	Décès	Dommages (millions \$ par an)	Nombre de décès par évènement	Dommages par évènement (millions €)
1990-1999	22	137	269	6	122
2000-2009	46	196	804	4	175
2010-2019	20	322*	303	16	152

Source EM-DAT 2020

* dont 109 décès (dans cette base) pour les deux méga-feux de juin et octobre 2017 au Portugal

Feux catastrophiques jusqu'en 2018

- Mati , Grèce, 2018, 99 décès
- Central Region, Portugal, 2017, 53 décès
- Pedrogao Grande, Portugal, 2017, 66 décès
- Horta de Sant Joan, Espagne, 2009, 5 décès
- Makistos–Artemida, Grèce, 2007, 30 décès
- Riba de Saelices, Espagne, 2005, 11 décès
- Ikaria, Grèce, 1993, 13 décès
- Curraggia, Italy, 1983, 9 fatalities
- A´ gueda, Portugal, 1986, 16 décès
- Armamar, Portugal, 1985, 14 décès
- La Gomera, Espagne (Canaries), 1984, 20 décès
- Lloret de Mar, Espagne 1979, 21 décès
- Sintra Mountains, Portugal, 1966, 25 décès

Molina et al 2019,
Int J Wildland Fire

