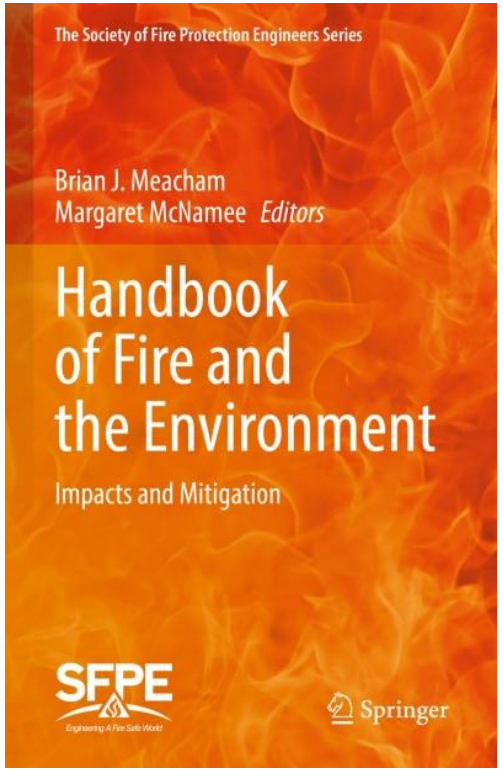
IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES INCENDIES

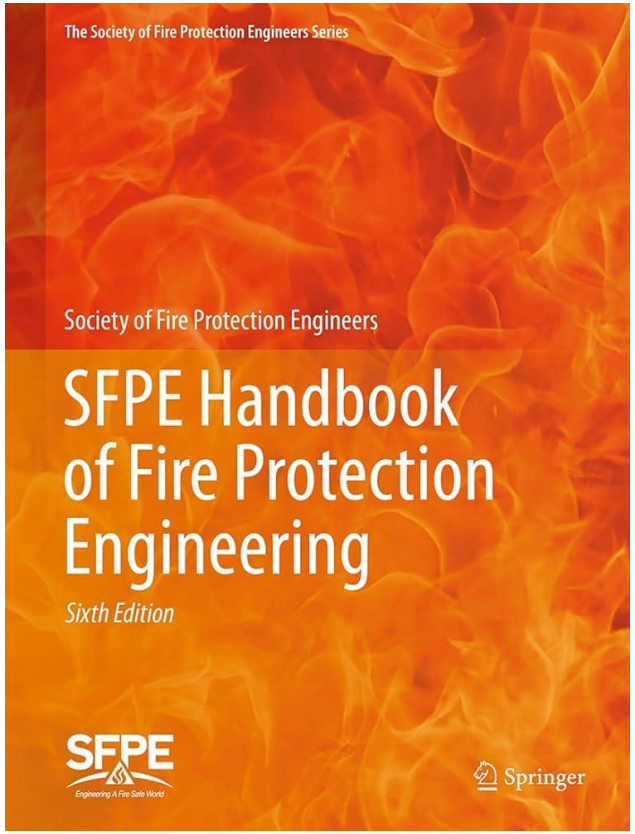
ERIC GUILLAUME, EFECTIS FRANCE

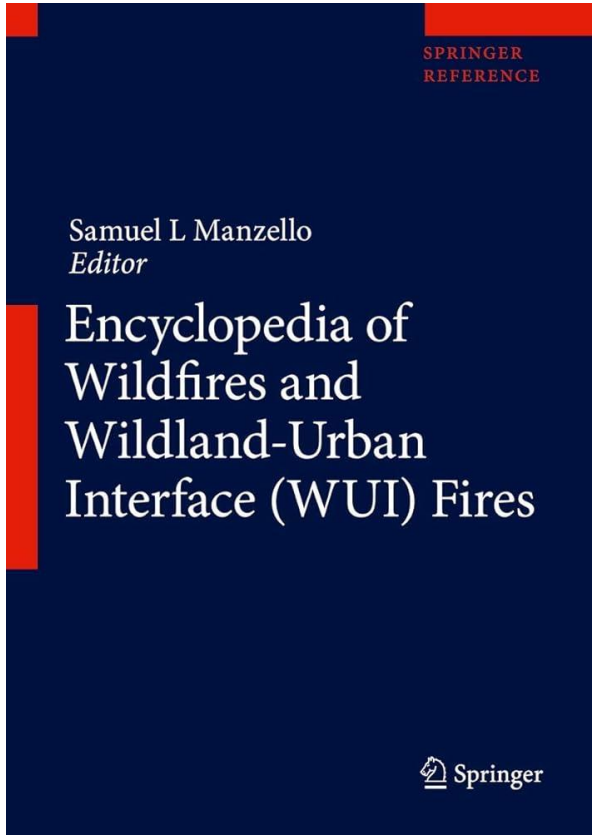
RESOFEUX, 10-11 JUILLET 2025

IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES INCENDIES

- Feux de forêts, WUI et incendies industriels
- Émissions – Dispersion – Impacts sur l'air, l'eau, le sol
- Basé sur travaux ISO TC 92 et publications ouvrages (McNamee, Guillaume…). Série ISO 26367, ISO/TR 26368, ISO 19677







OBJECTIFS DE LA PRÉSENTATION

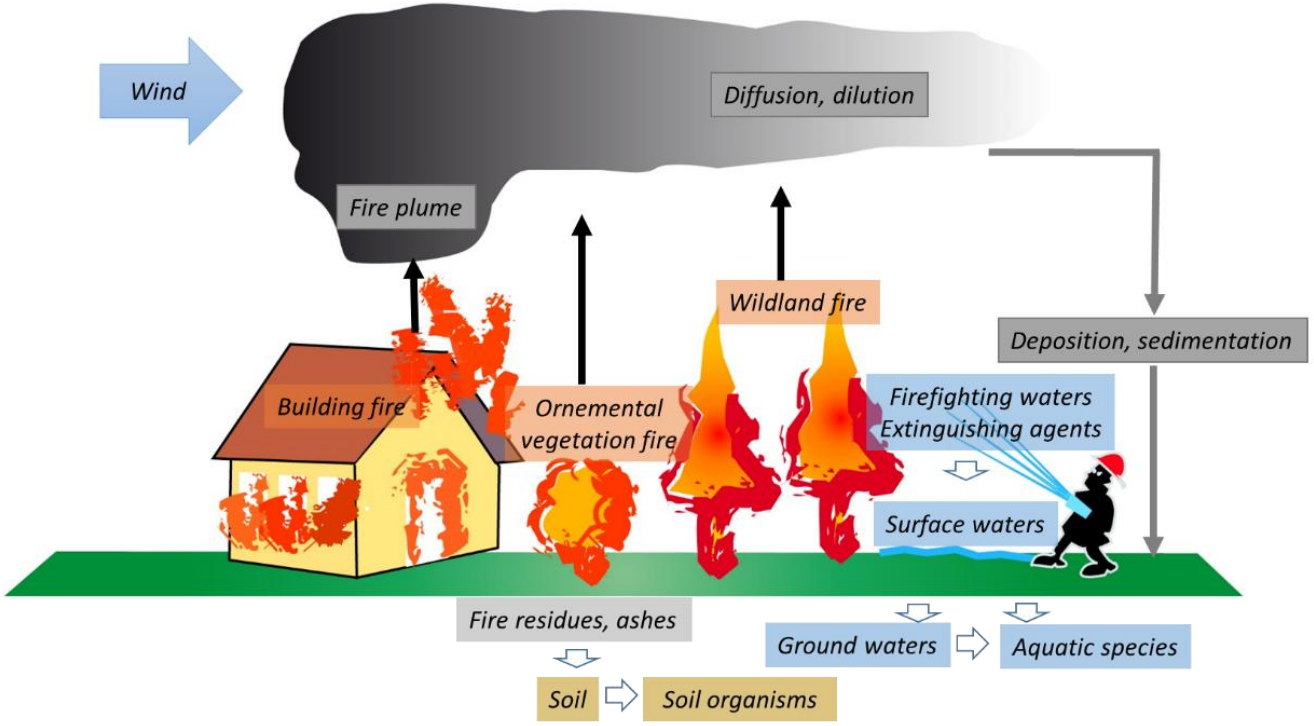
- Identifier les principaux impacts environnementaux des incendies
- Comprendre les mécanismes de dispersion et de transformation chimique
- Explorer les outils de mesure et de modélisation
- Comparer les effets aigus et chroniques

TYPOLOGIE DES INCENDIES

- Feux naturels : forêts, tourbières, savanes
- Feux WUI : interface végétation – constructions humaines
- Incendies industriels : installations classées, entrepôts, SEVESO
- Diversité des combustibles → diversité des effluents

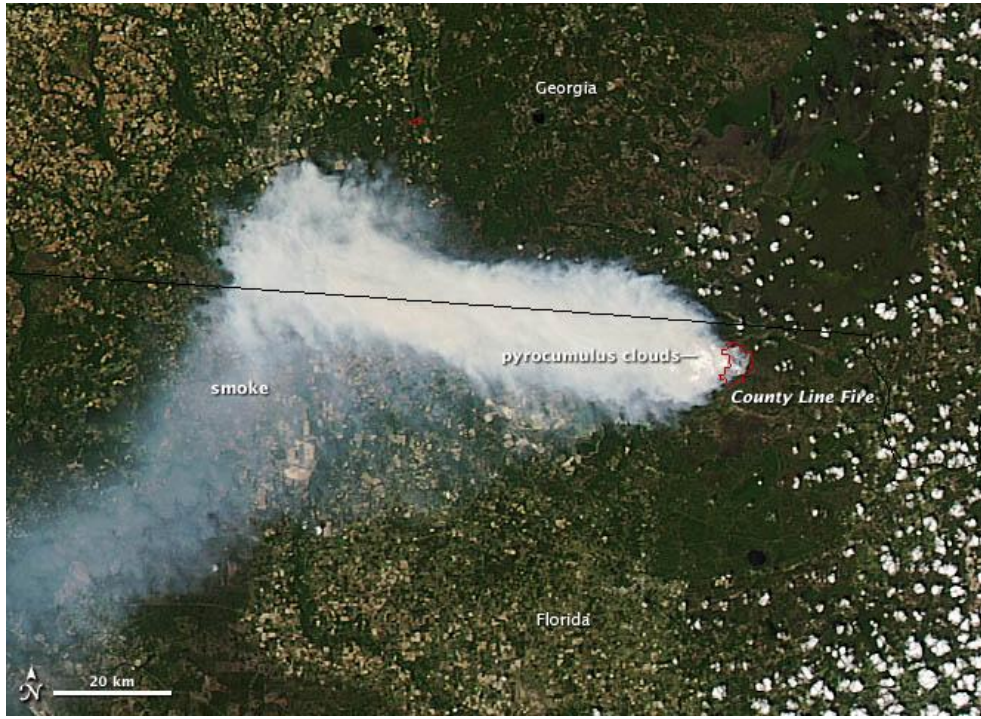
VOIES DE CONTAMINATION ENVIRONNEMENTALE

- Air : gaz, particules, aérosols
- Eau : ruissellements, infiltration de polluants, eaux d'extinction
- Sol : dépôts de cendres, lixiviation, perturbation biologique
- Chaînes alimentaires, flore, faune, santé humaine



FACTEURS INFLUENÇANT LES ÉMISSIONS

- Taille et durée de l'incendie
- Nature et humidité du combustible
- Intervention des pompiers
- Conditions météorologiques : vent, humidité, température
- Topographie : pente, vallée → érosion et confinement



Nature des effluents

EFFLUENTS GAZEUX DES INCENDIES

- Effets aigus / court terme

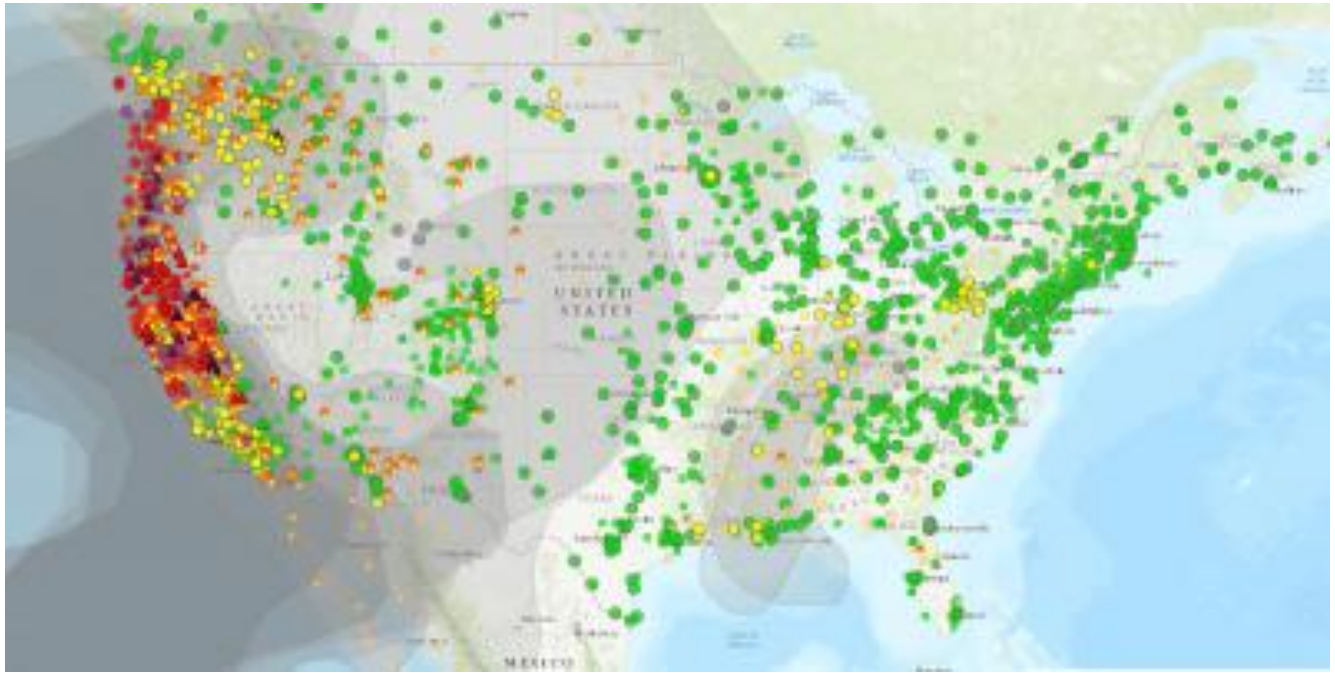
Species	Analytical environmental phase
Halogenated acids (HCl, HBr, HF) Nitrogen oxides (NO, NO_2, N_2O) Sulphur dioxide (SO_2) Volatile Organic compounds (VOCs)	Air
Metals	Air, water, soil
Particulates	Air, water, soil

- Effets long terme / chronique / environnemental

Species	Analytical environmental phase
Metals	Air, water, soil, sediment
Particulates	Air, water, soil
Perfluorinated compounds (PFCs) Polychlorinated biphenyls (PCBs)	Water, sediment, soil
Polychlorinated dibenzodioxins and furans (PCDD/PCDF)	(Air), water, sediment, soil
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)	Air, water, soil
Volatile Organic Compounds (VOCs)	Air, water, sediment, soil
Endocrine disruptors	Water, sediment, soil

PARTICULES ET AÉROSOLS

- PM10 et PM2.5 : pénétration pulmonaire
- Carbone suie, black carbon : effets climatiques
- Transporteurs de HAP, dioxines, métaux lourds
- Visibilité, dépôt sur sols et végétation



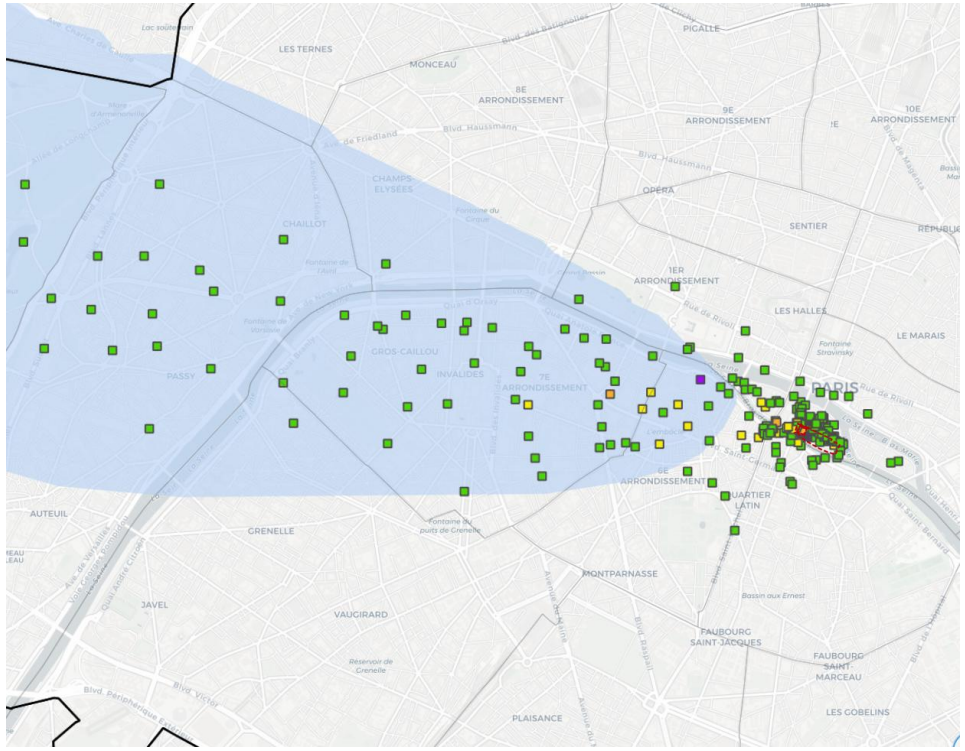
Air Pollution From California Wildfires on 8/11/20 over USA territory and Pacific. Data from Fire and smoke Map, U.S. EPA AirNow Program and U.S. Forest Service

COMPOSÉS ORGANIQUES TOXIQUES

- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- Dioxines, furanes, PCB
- VOCs : benzène, toluène, acroléine
- Effets chroniques : cancer, perturbation endocrine

MÉTAUX LOURDS ET ÉLÉMENTS TRACES

- Plomb, mercure, arsenic, cuivre, chrome
- Présents dans bois traités, vieux bâtiments, déchets
- Contamination de l'air, de l'eau, du sol
- Toxicité aiguë et accumulation dans les chaînes alimentaires



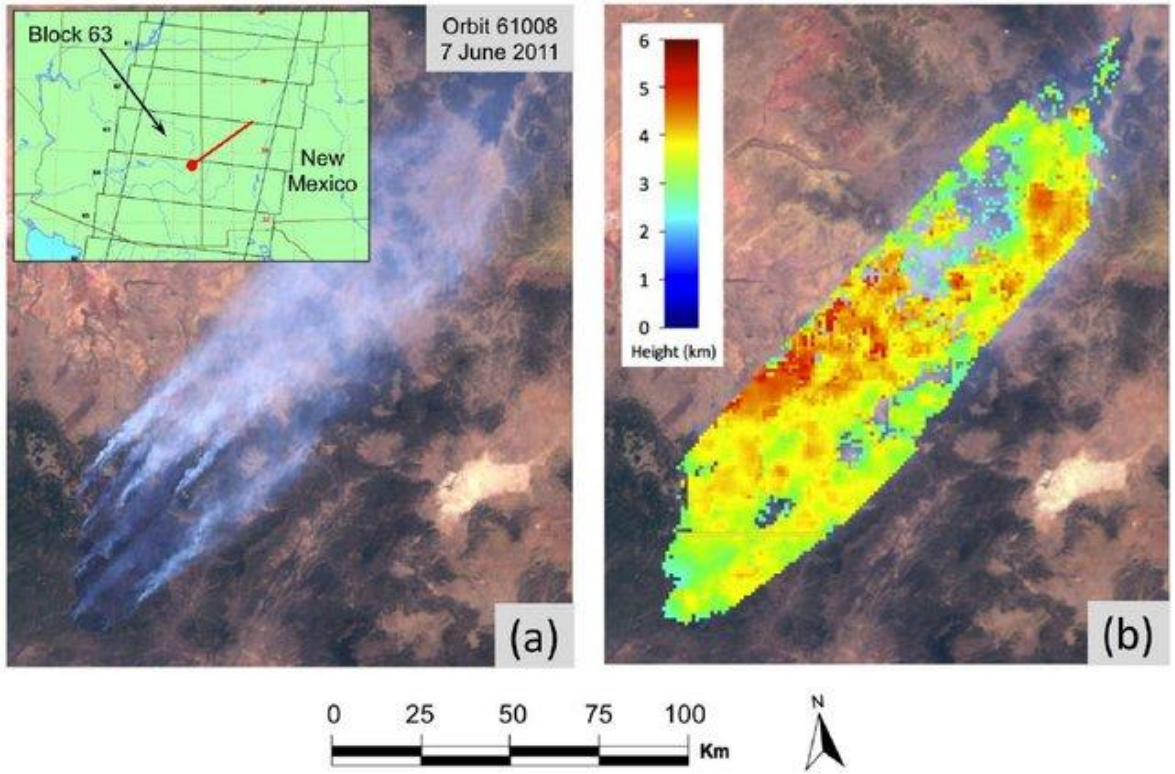
Examples of sampling of lead contamination of soils after Paris Notre-Dame cathedral fire, April 15th, 2019. Green squares mean lead concentration below 5,000 µg/m². Yellow means between 5,000 and 20,000 µg/m². Orange means between 20,000 and 50,000 µg/m² and purple over 50,000 µg/m². The fire perimeter is in red

POLLUANTS SPÉCIFIQUES AUX FEUX WUI ET INDUSTRIELS

- PVC, retardateurs de flamme (brome, phosphore, fluorés…)
- Produits ménagers, pesticides, solvants
- Asphalte, hydrocarbures, engrais
- Polluants inattendus : anciens matériaux interdits, polluants séquestrés

DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE DES PANACHES

- Transport à courte et longue distance
- Influence du vent, stabilité atmosphérique
- Topographie (vallées, montagnes)
- Effet des inversions thermiques



Example of satellite monitoring of plume height from a wildland fire, The Wallow fire in Arizona, June 7th, 2011

HAUTEUR D'INJECTION ET DÉPÔT DU PANACHE

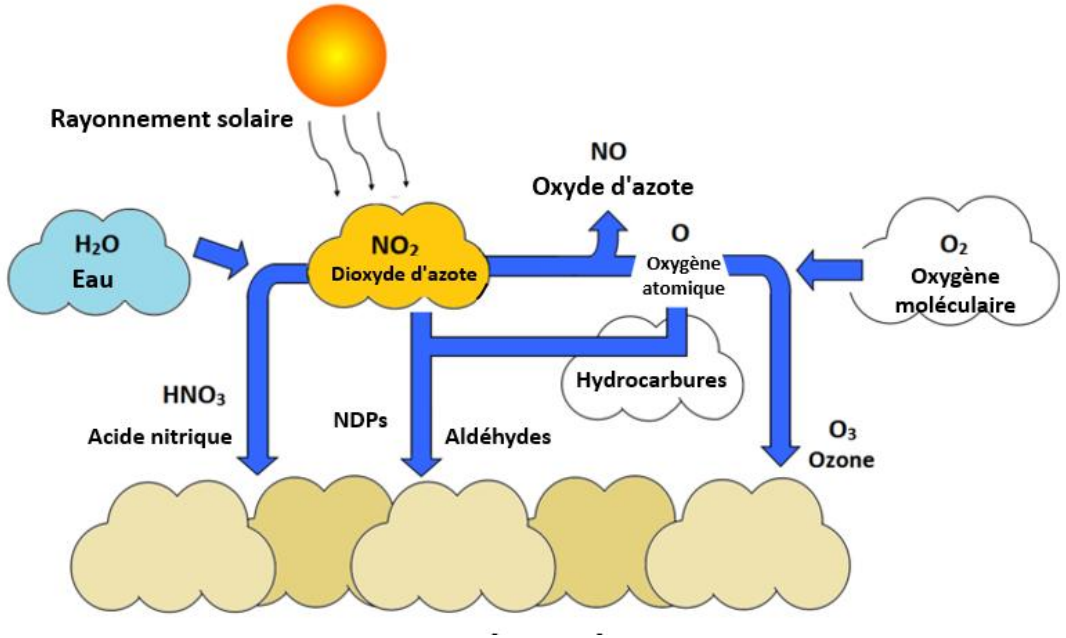
- Altitude d’injection = durée et portée du transport
- Puissance thermique au départ, couche d’inversion
- Plus le panache est haut, plus le dépôt est éloigné
- Dépôt sec vs dépôt humide (pluies acides)
- Revolatilisation des composés semi-volatils

Feu de Notre-Dame, INERIS

Feu de Minerva, 2018

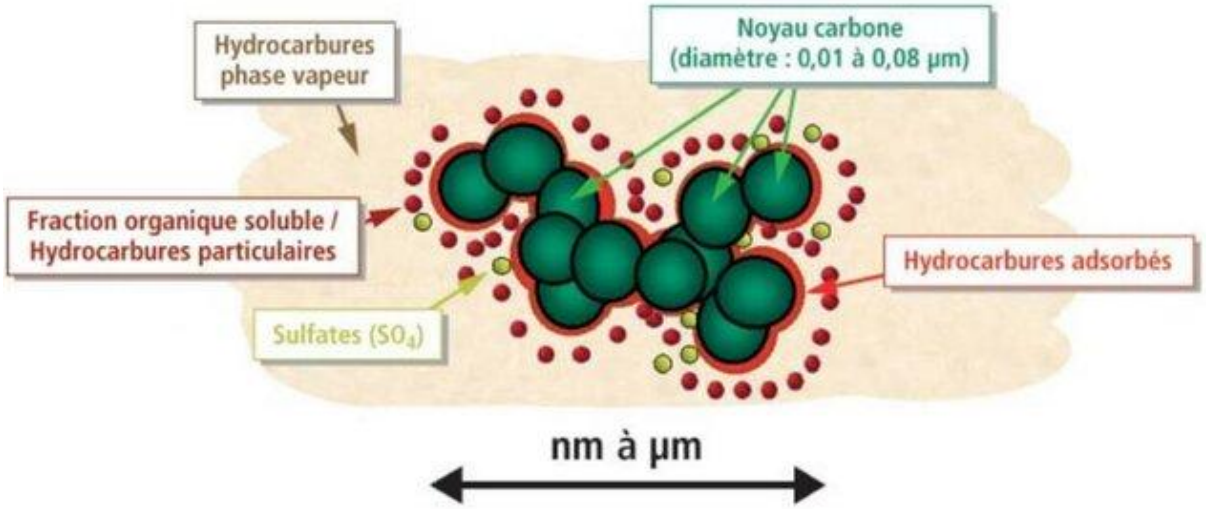
PHOTOCHIMIE POST-ÉMISSION

- Polymérisation du formaldéhyde, oxydation du NO…
- Transformation de NOx → formation d'ozone troposphérique
- Formation d'aérosols secondaires (SOA), coalescence et création (composés soufrés)
- Altération par UV, température, humidité
- Formation de nitrates, acides organiques



COMPOSÉS SEMI-VOLATILS ET ADSORBÉS

- HAP, dioxines, PCB peuvent être adsorbés sur les particules
- Migration via PM2.5, dépôt dans les sols/eaux
- Volatilisation puis re-condensation
- Transport dans la chaîne alimentaire



Modélisation

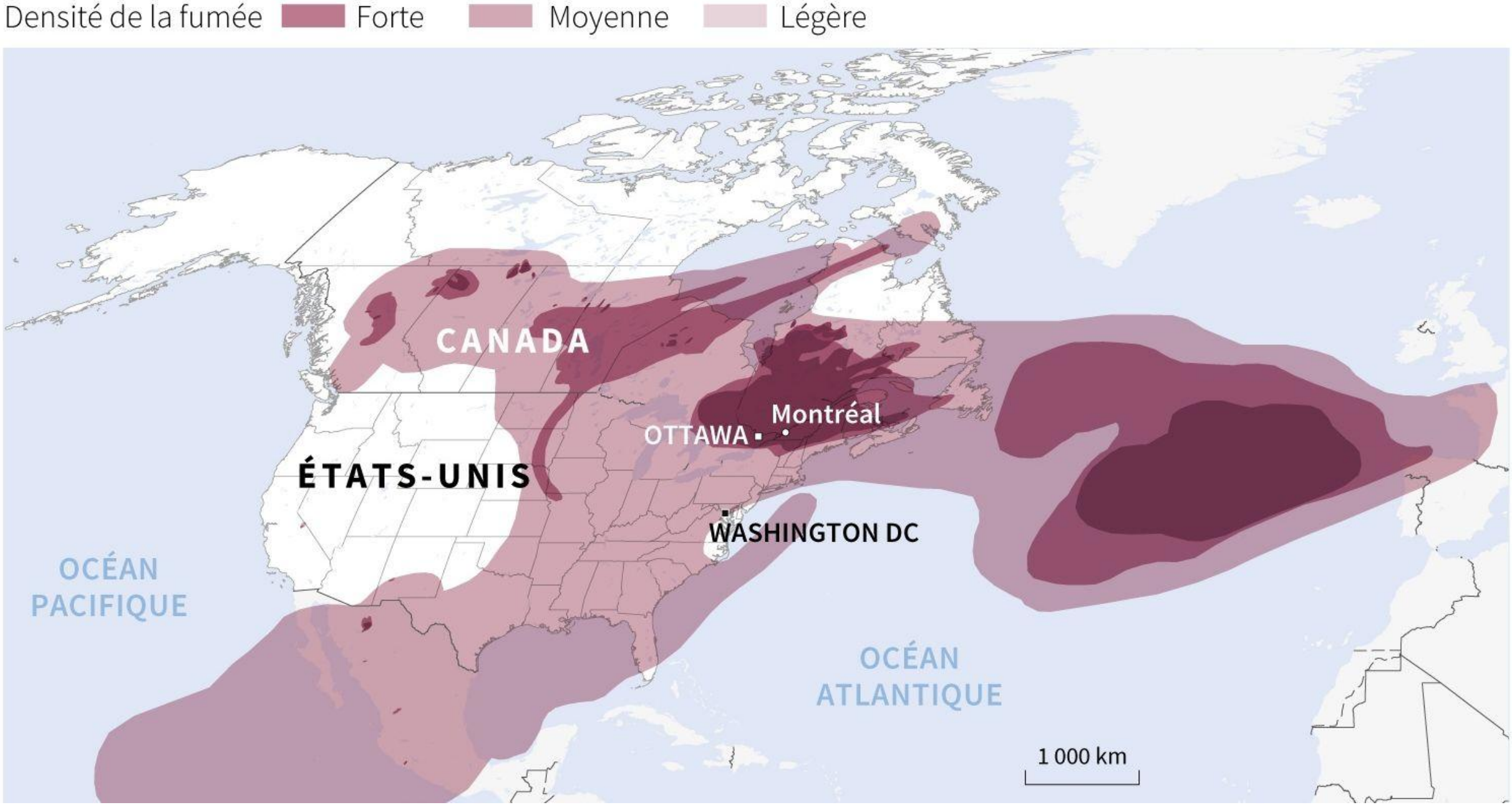
EFFETS LONGUE DISTANCE – EXEMPLES

- Feux de tourbière (ex : Russie 2010) → pollution à 1000 km
- Feux de steppes dans la région de Tchernobyl : détection en Europe de l'ouest
- Feux en Californie → PM2.5 mesurés sur côte Est des USA
- Incendie de Lubrizol (Rouen) : dépôt visible sur 50 km
- Incendie de Buncefield : dépôt de suies sur les Pyrénées
- Feux canadiens affectent régulièrement la qualité de l'air en Europe – épisode récent en juin 2025

- Impacts transfrontaliers → enjeux réglementaires

Efectis

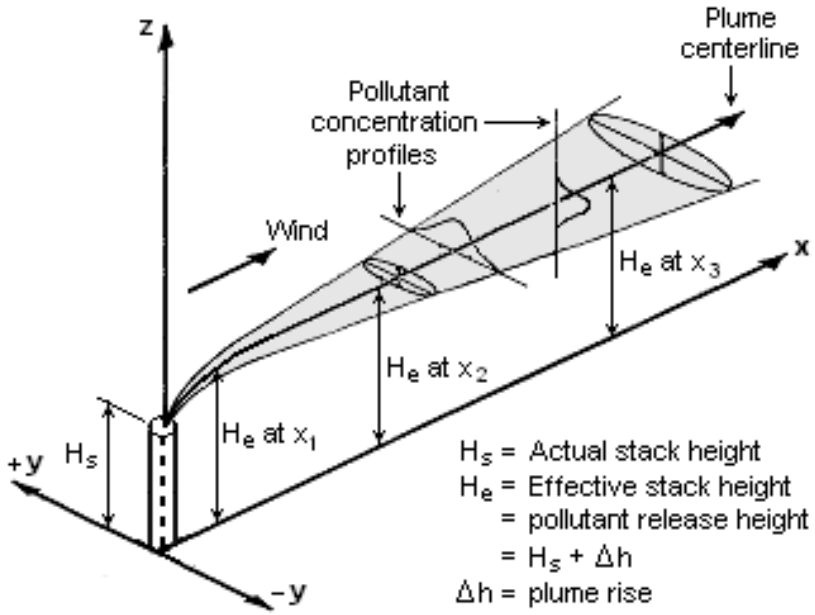
Le nuage de fumée des incendies au Canada



MODÈLES DE DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE

- Modèles Gaussiens (AERMOD, ADMS, PHAST)
- Modèles Lagrangiens (FLEXPART)
- Modèles CFD (ALOFT, Fire Dynamics Simulator, OpenFOAM)

- Utilisation combinée avec données satellites et météo



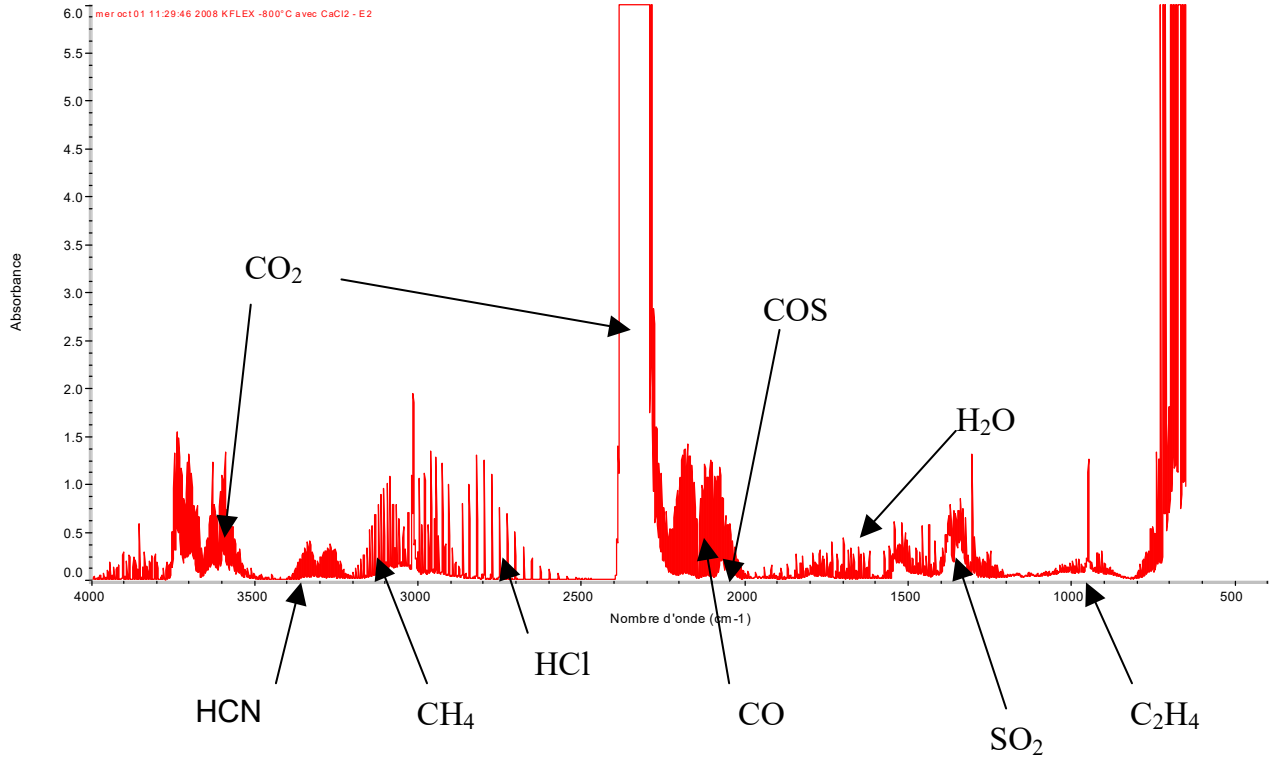
$$C(x,y,z,t) = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{M_i}{(2\pi)^{3/2}\sigma_{x_i}\sigma_{y_i}\sigma_{z_i}} \exp\left(-\frac{[x-x_0-u(t-t_i)]^2}{2\sigma_{x_i}^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_{y_i}^2}\right)\left[\exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_{z_i}^2}\right) + \alpha \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma_{z_i}^2}\right)\right]$$

Analyses

MESURES ET PRÉLÈVEMENTS – AIR

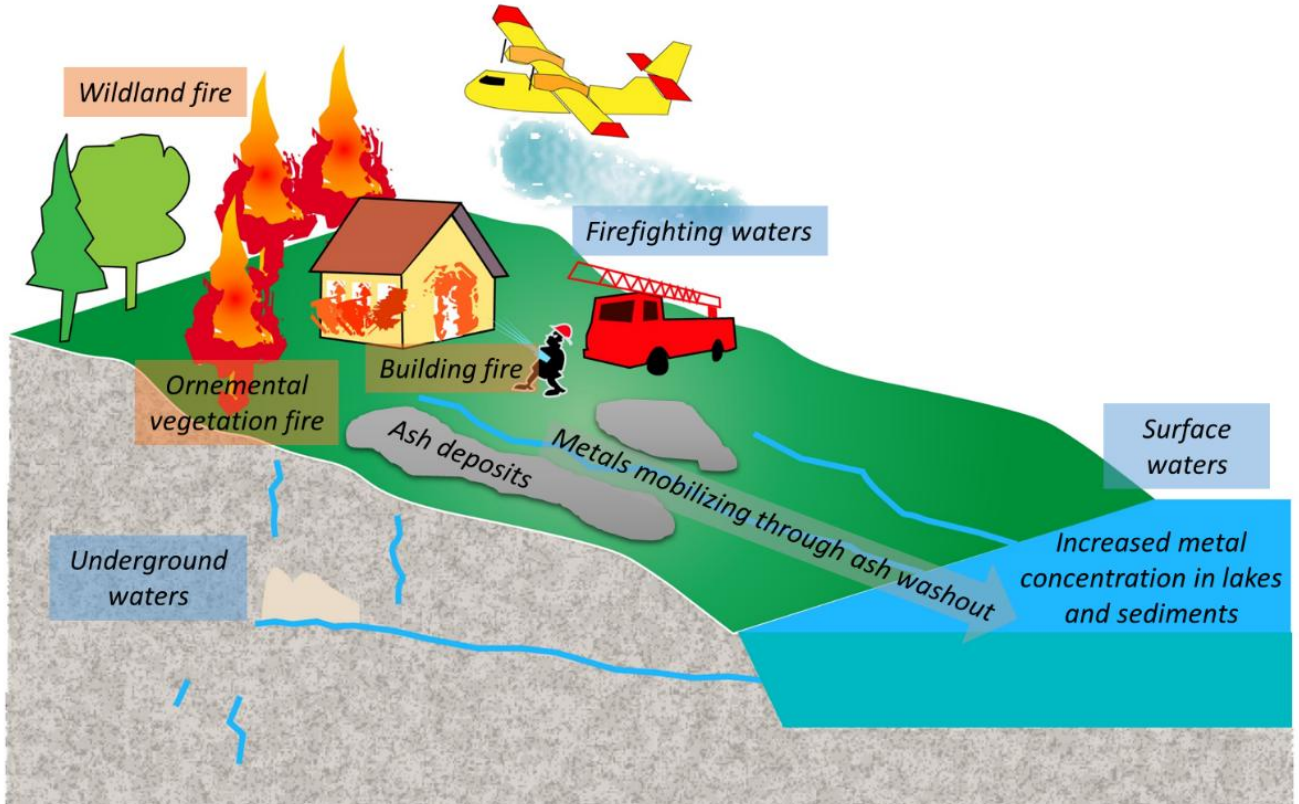
- Satellites
- Drones, ballons captifs, avions légers
- Stations sol (NOx, CO, PM2.5, HAP)
- Prélèvements directs dans le panache (échantillonnage actif)

- Normes : ISO 11771, ISO 26367



MESURES ET PRÉLÈVEMENTS – SOL ET EAUX

- ISO 5667 : prélèvements eau de surface / souterraine
- ISO 10381 : prélèvements de sol après feu
- Analyse de métaux, PFC, HAP, pH, turbidité
- Échantillons filtrés, congelés, ou conservés selon la cible



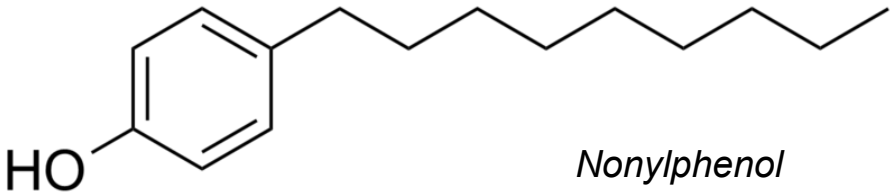
Effets et mesure des impacts

EFFETS AIGUS DES INCENDIES

- Irritation respiratoire (SO_2, NO_2, HX, formaldéhyde)
- Asphyxie (CO, HCN)
- Effets toxiques sur poissons (eaux d'extinction)
- Dépôts acides → corrosion de structures, végétation brûlée

EFFETS CHRONIQUES / LONG TERME

- Bioaccumulation de métaux lourds, dioxines, PCB
- Perturbation endocrinienne (PFC, retardateurs)
- Effets sur la fertilité, la faune, la flore
- Contamination durable des nappes phréatiques



Nonylphenol

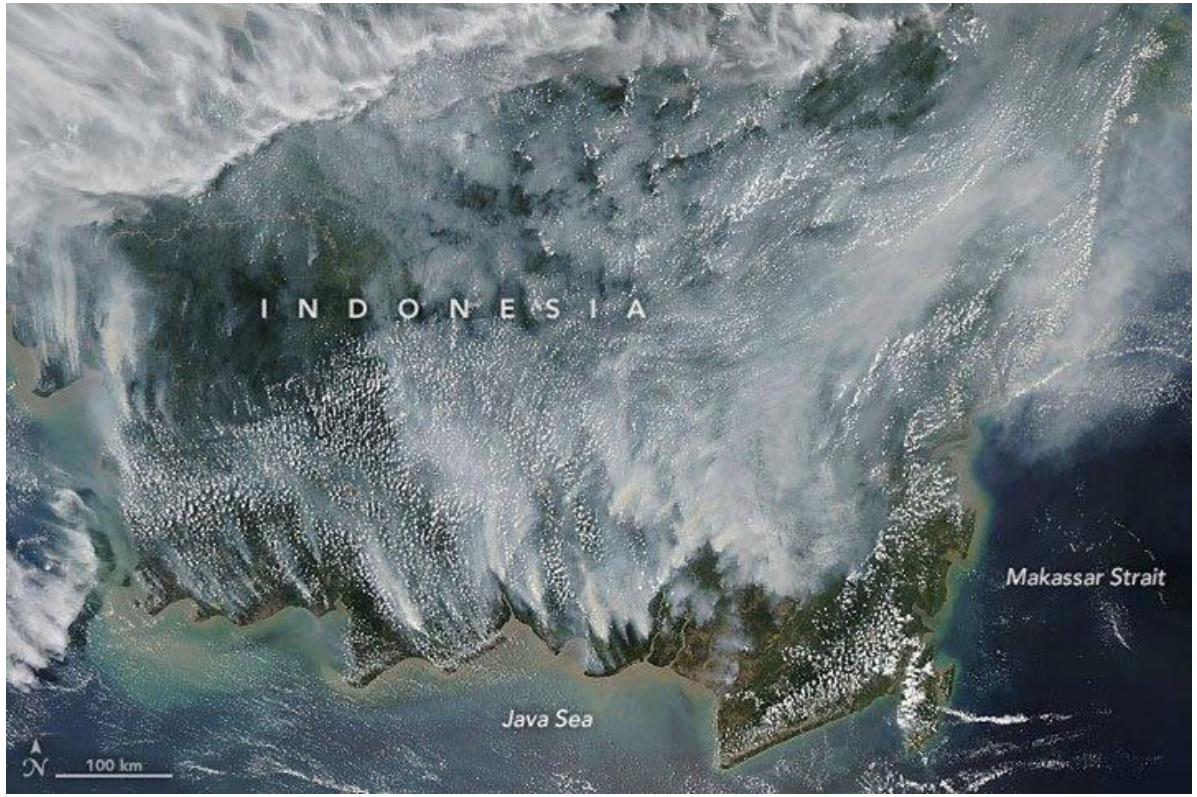
Efectis

IMPACT SUR LES ÉCOSYSTÈMES

- Perte de biodiversité locale (feux répétés)
- Modification des chaînes alimentaires
- Effets sur les amphibiens, poissons, oiseaux
- Pollution des sols = colonisation par espèces invasives

IMPACTS SUR LE CLIMAT

- Émissions de CO_2 → effet de serre à long terme
- Suies (black carbon) → réchauffement atmosphérique local → rétroaction
- Aérosols → albédo, formation de nuages (pyrocumulus)
- Feux de tourbières : libération de carbone ancien séquestré



Efectis

IMPACTS SUR L'EAU

- Ruissellement pollué (HAP, métaux, PFC, mousse)
- Pollution des eaux de surface → mortalité piscicole
- Pollution des eaux souterraines → effets à long terme
- Risques pour l'eau potable et stations d'épuration

Eau chargée de sédiments s'écoule dans la rivière Athabasca après les incendies de Fort McMurray, Canada

IMPACTS SUR LES SOLS

- Dépôts de cendres riches en métaux et produits organiques
- Augmentation du pH, perturbation des micro-organismes
- Érosion accrue en l'absence de végétation
- Recontamination par lixiviation ou dépôt atmosphérique

Efectis

IMPACTS SUR LA SANTÉ HUMAINE

- Effets aigus : irritations, asthme, œdèmes
- Effets chroniques : cancer, maladies respiratoires
- Groupes sensibles : enfants, personnes âgées, pompiers
- Effets indirects : contamination des aliments et de l’eau

Conclusions

PANORAMA NORMATIF

Guides

- ISO 26367-1 Guide général
- ISO 26367-2 Méthodologie
- ISO 26367-3 Echantillonnage et analyse
- ISO TR 26367-5 Analyse qualitative des émissions
- ISO TR 26368 Bassins de rétention

Analyses

- ISO 19677 Impact environnemental des feux d'espaces naturels
- ISO 19701 Analyses classiques
- ISO 19703 Facteurs d'émissions
- ISO 19702 Analyses IRTF
- ISO 29904 Analyse des aérosols

Impact

- ISO 26367-4 Modèles LCA feu
- ISO 13571 Toxicité aigue (incpacitation)
- ISO 13344 Toxicité aigue (létalité)
- ISO TR 25885 Toxicité des aérosols
- ISO 25884 Effets subincapacitifs

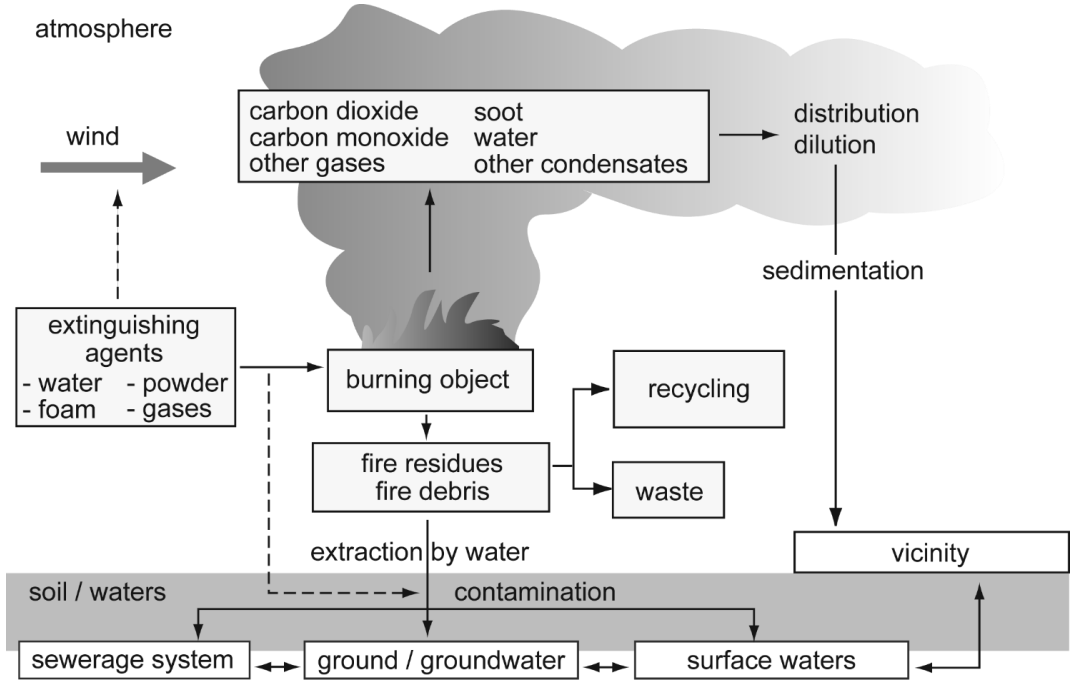
Efectis

ÉLÉMENTS DE CONCLUSION

- Les incendies sont des sources majeures de pollution environnementale
- Tous les milieux (air, eau, sol) sont concernés, parfois durablement
- L’évaluation nécessite des outils de mesure, modélisation et suivi
- Des efforts restent à faire pour intégrer ces enjeux dans la gestion de crise

ANALYSE COÛT-BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTALE

- Les feux naturels peuvent favoriser régénération de l'écosystème
- Mais les feux intenses ou répétés perturbent les sols, faune, flore
- Feux prescrits = outil de gestion mais à émissions contrôlées.
  - Réduction de la biomasse combustible
  - Contrôle des zones à risque élevé (WUI)
  - Émissions moindres comparées aux grands incendies
  - Importance du moment (météo, humidité) pour limiter impact
  - Nécessité d'équilibrer prévention et émissions
- Stratégies de mitigation environnementale :
  - Surveillance des zones sensibles (topographie, pollution ancienne)
  - Choix raisonné des agents extincteurs
  - Systèmes de rétention des eaux d'extinction
  - Réhabilitation des sols et replantation post-incendie

PERSPECTIVES DE RECHERCHE ET NORMALISATION

- Améliorer la connaissance des termes sources
- Améliorer la précision des modèles de dispersion et d'impact
- Développer des bases de données post-incendie (effluents, sols, eaux)
- Normes ISO en développement (ISO 26367…)
- Évaluation des effets à long terme (santé, environnement, climat)