RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

ESSAIM DE DRONES AUTONOMES POUR LA CARACTÉRISATION DES RETOMBÉES ATMOSPHÉRIQUES EN CAS D'INCENDIE INDUSTRIEL

BRICE BERTHELOT
Responsable PlateForme Incendie

35èmes journées du Groupe du RésoFeux
10 et 11 juillet 2025, ASNR, Fontenay-aux-Roses

Contexte

Evolution croissante de l'accidentologie en France (Source BARPI, 2020)

- contribution significative des sites SEVESO
- moitié des occurences : des **Incendies**

Les incendies de Lubrizol en 2013 et de Lubrizol et NL Logistique en 2019 ont mis en exergue :

- des risques de plus en plus nombreux et diversifiés;
- des conséquences immédiates graves pour le personnel, les riverains, les biens et l'environnement.

Pour caractériser l'impact de tels évènements, il y a besoin d'outils et de méthodes fournissant des réponses rapides, permettant une collecte de données fiables.

Rouen, le 26 septembre 2019
©France 3 Normandie

Outils existants :

- Obligation pour l'exploitant de disposer pour la phase de suivi immédiat de capacités adaptées.
- Le réseau de laboratoires RIPA pour la phase post-accidentelle.

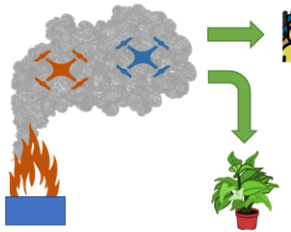
Besoins persistants :

- Difficultés à connaître la composition des fumées.
- Difficultés à fournir des données fiables aux outils de modélisation atmosphérique.

Quelles réponses technologiques les drones peuvent-ils apporter en situation accidentelle ? Notamment pour la modélisation atmosphérique ?

Le potentiel des drones

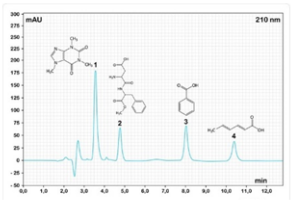
Caractérisation chimique des panaches



benzene

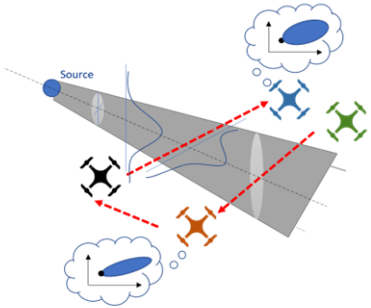
HAP, métaux…

- Prélèvements *in-situ* des polluants pour la caractérisation des polluants en différé



- Suivi de l'évolution des espèces

Aide à la modélisation



- Cartographies de concentrations, suivi temporel…
- Détermination de gradients de paramètres décrivant les panaches (température, concentration…)
- Données comparatives des caractéristiques physiques des panaches (hauteurs, largeurs…)
- Caractérisation physique des polluants (morphologie des suies…)

Outil de décision à distance

- Mise en sécurité des opérationnels
- Accès à des zones inaccessibles par un opérationnels
- Synergies entre corps de métiers

DESIHR

Utilisation d'une flotte de drones autonomes capables d'adapter leurs plans de vols selon les informations acquises par chacun d'eux afin de remplir deux missions.

Mission 1

- se positionner dans l'axe de dispersion du panache à des distances croissantes
- réaliser des **mesures temps-réel de polluants** et des **prélèvements analysés au sol sur chromato/spectro de masse portable ou en laboratoire pour les suies**

Mission 2

- **acquérir depuis l'extérieur du panache des images vidéo de celui-ci, en simultané et suivant différents angles de vue**
- transmettre les acquisitions en direct du terrain et un lieu distant de plusieurs kilomètres (cellule de crise)
- **déterminer différents paramètres utiles à la modélisation du panache** par traitements d'images

Mission 1

Prélèvements & mesures temps-réel

Prélèvements & Mesures TR

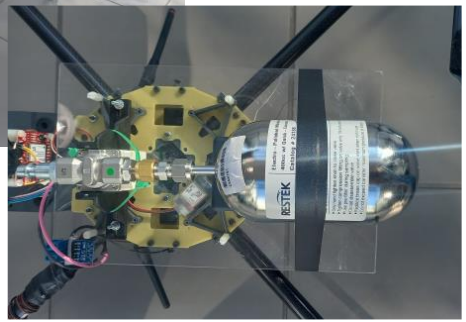
Prélèvements sur canisters inertés & fonctionnalisés

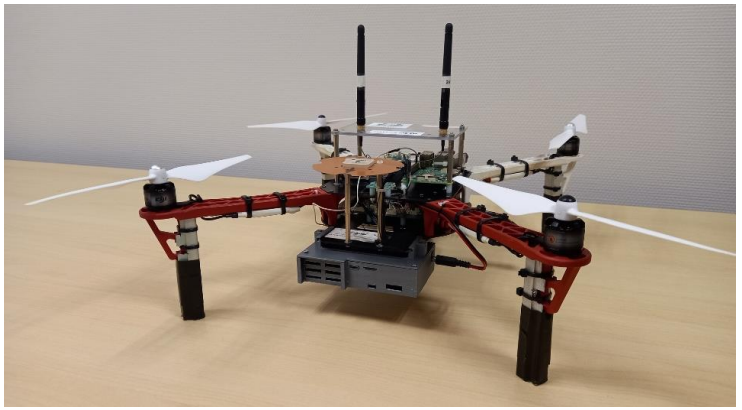
Sélection de traceurs et de paramètres environnemnetaux

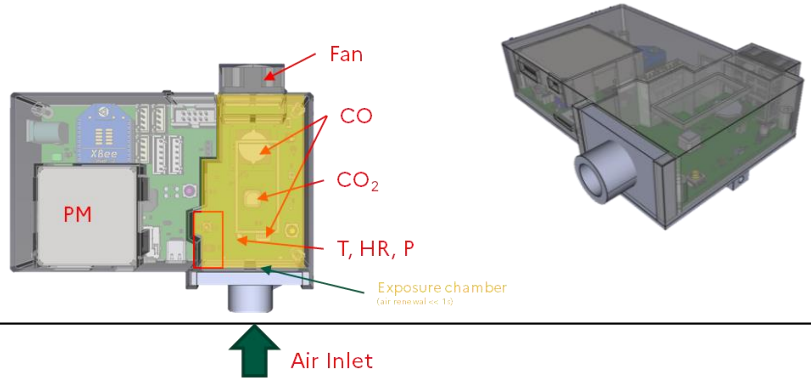
- polluants particulaires : **particules < 40 µm**
- polluants gazeux : **CO_2** et **CO**
- paramètres aditionnels: temperature, humidity, pressure

Sélection des capteurs sur la base de

- **l'expertise de l'INERIS**
- **besoins pour la modélisation**
- contraintes énergétiques et mécaniques



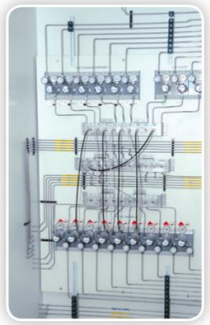


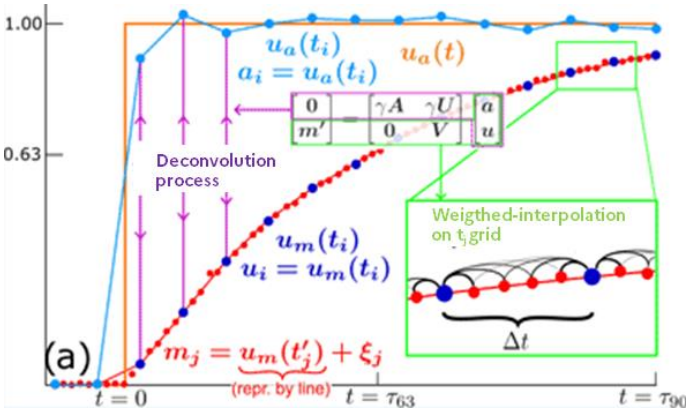


Mesures temps réel

Caractérisation du comportement dynamique des capteurs

- Systèmes du 1er ou 2nd ordre
- Phénomènes bien connus dans le monde de l'automatisme
- Théorie des systems linéaires permet une correction temps-réel (deconvolution)
- Correction embarquable sur cible STM32



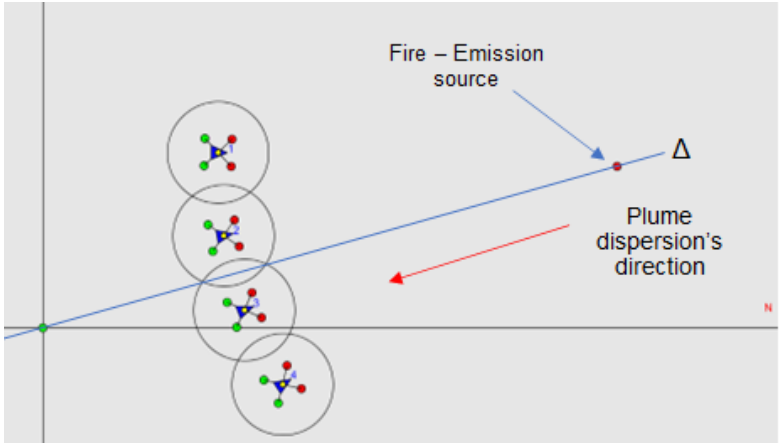


µC-embeddedable correction

Déploiement des drones

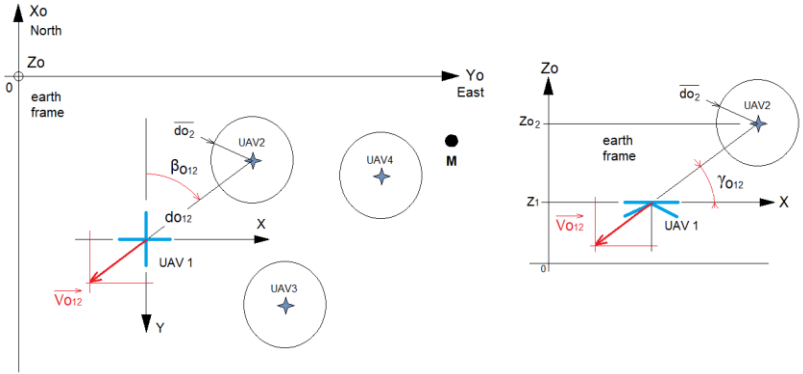
Gestion décentralisée de la flotte

- Chaque drone communique avec ses voisins sa position et se dirige en function de l'origine du feu et de conditions météorologiques
  - Réseau meshé
  - Aucun algorithme sur une base de contrôle



Définition de forces attractives et répulsives

- Forces attractives entre la source de l'émission et les drones
- Forces de repulsion entre les drones et avec la source
  - Gestion dynémique des collisions et des obstacles
  - Reconfiguration automatique des drones
  - Surface de balayage des drones ajustable

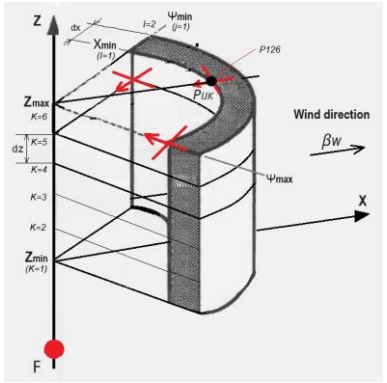


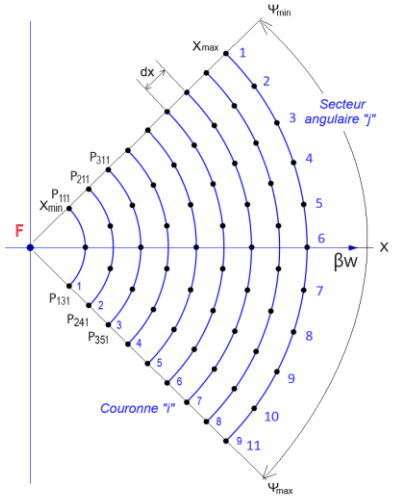
Definition of repulsive forces in 3D (spheres)

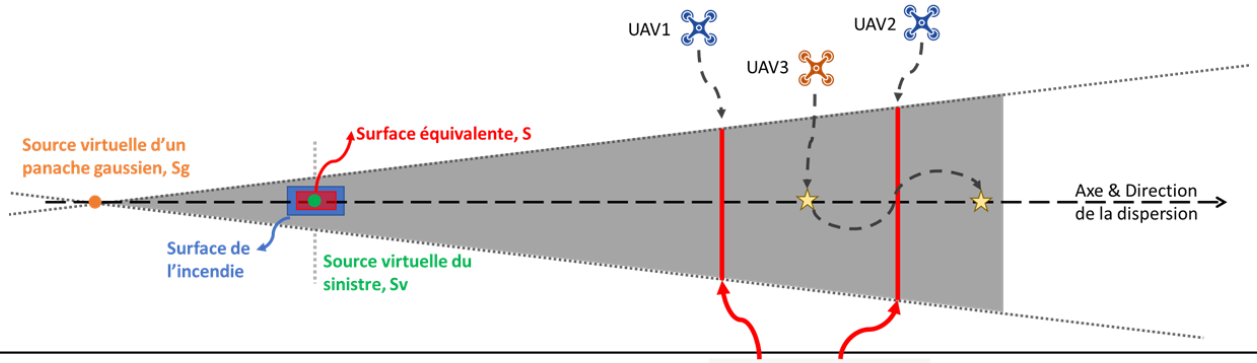
Déploiement des drones

Plan de vol sur la périphérie de portions de cyclindre

- Maillage de l'espace
- Chaque drone peut s'occuper d'une cellule
- Optimisation possible du balayage des cellules







Mission 2

Acquisition et traitement d'images

Stratégie initiale d'acquisition des images

Démarche cohérente avec le guide Omega 16

Basée sur le modèle Heskestad

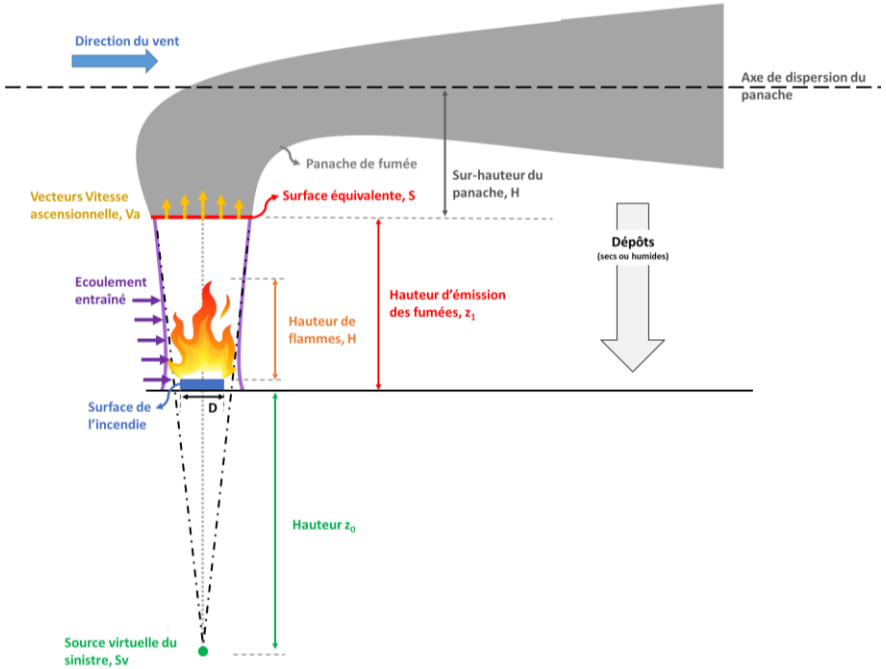
- Détermination de la puissance du feu reposant sur

La mesure de la hauteur des flammes visibles

Définition d'un terme source subséquent

- Hauteur d'émission
- Surface S d'émission
- Vitesses ascensionnelles
- Débit des fumées

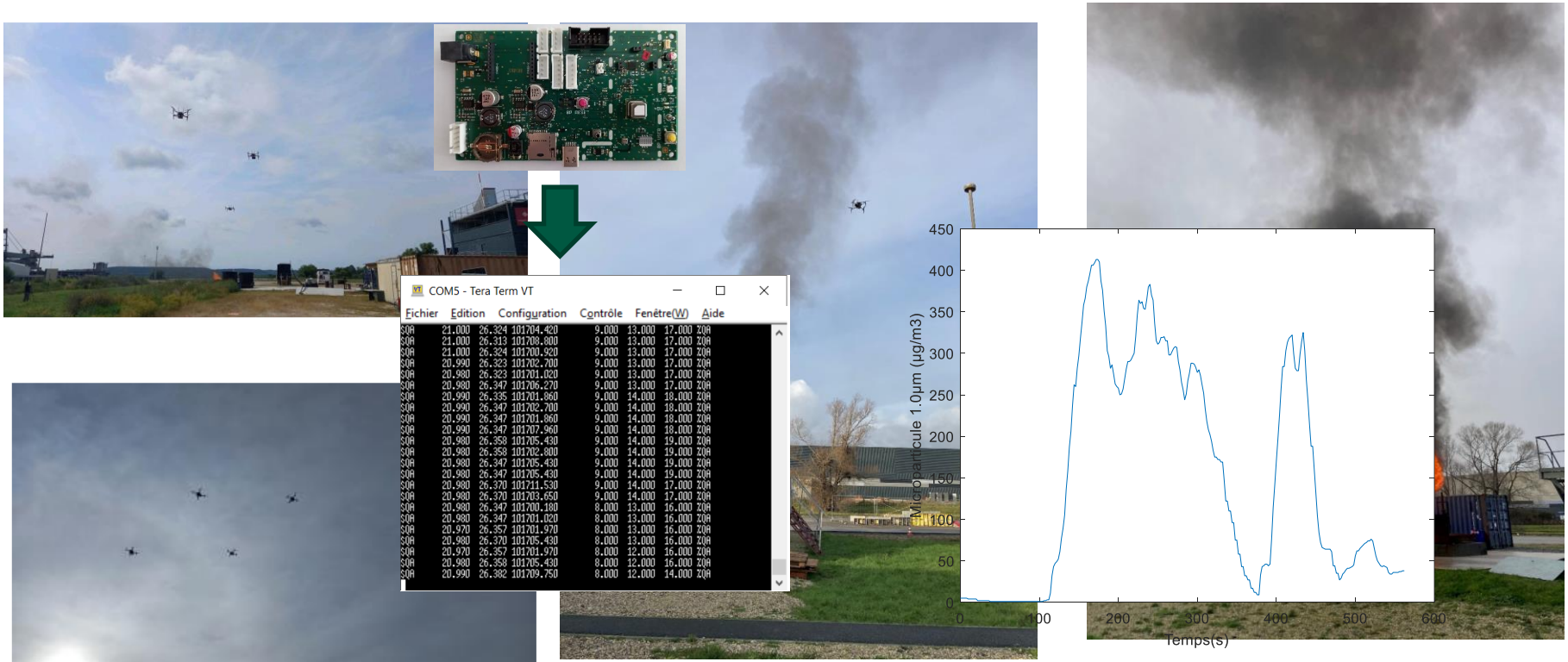
Données d'entrée pour des modélisations de dispersion des polluants



Application pratique

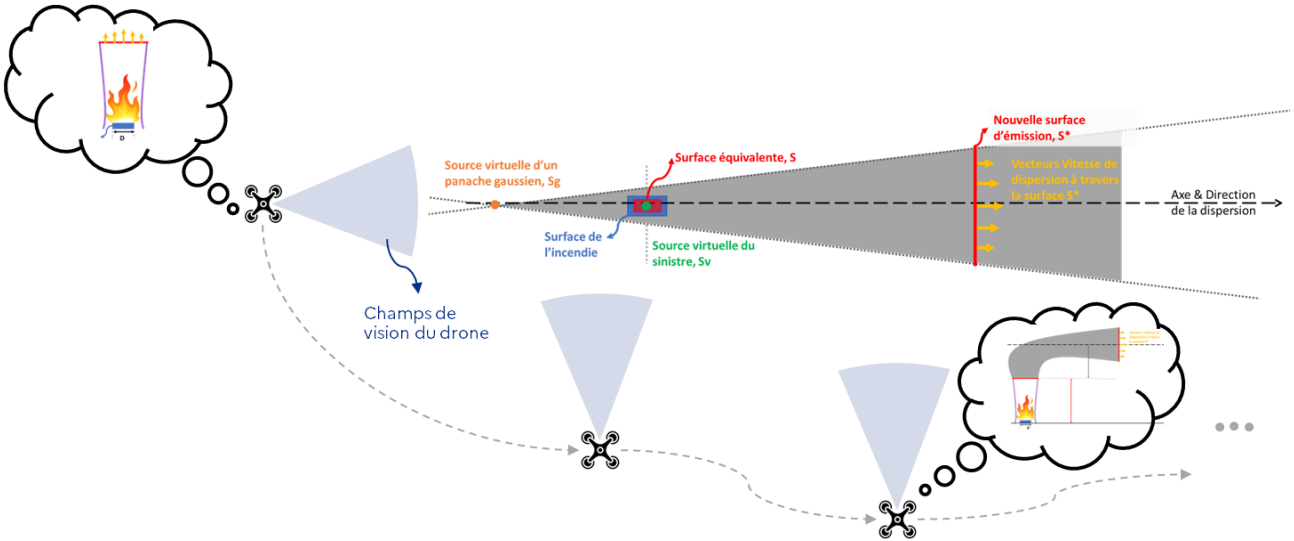
Campagnes expérimentales chez LauguiConcept

LAUGUICONCEPT
Sécurité 360


COM5 - Tera Term VT
Fichier Edition Configuration Contrôle Fenêtre(W) Aide
$QA 21.000 26.324 101704.420 9.000 13.000 17.000 ZQA
$QA 21.000 26.313 101708.800 9.000 13.000 17.000 ZQA
$QA 21.000 26.324 101700.920 9.000 13.000 17.000 ZQA
$QA 20.990 26.323 101702.700 9.000 13.000 17.000 ZQA
$QA 20.980 26.323 101701.020 9.000 13.000 17.000 ZQA
$QA 20.980 26.347 101706.270 9.000 13.000 17.000 ZQA
$QA 20.990 26.335 101701.860 9.000 14.000 18.000 ZQA
$QA 20.990 26.347 101702.700 9.000 14.000 18.000 ZQA
$QA 20.990 26.347 101701.860 9.000 14.000 18.000 ZQA
$QA 20.990 26.347 101707.960 9.000 14.000 18.000 ZQA
$QA 20.980 26.358 101705.430 9.000 14.000 19.000 ZQA
$QA 20.980 26.358 101702.800 9.000 14.000 19.000 ZQA
$QA 20.980 26.347 101705.430 9.000 14.000 19.000 ZQA
$QA 20.980 26.347 101705.430 9.000 14.000 19.000 ZQA
$QA 20.980 26.370 101711.530 9.000 14.000 17.000 ZQA
$QA 20.980 26.370 101703.650 9.000 14.000 17.000 ZQA
$QA 20.980 26.347 101700.180 8.000 13.000 16.000 ZQA
$QA 20.980 26.347 101701.020 8.000 13.000 16.000 ZQA
$QA 20.970 26.357 101701.970 8.000 13.000 16.000 ZQA
$QA 20.980 26.370 101705.430 8.000 13.000 16.000 ZQA
$QA 20.970 26.357 101701.970 8.000 12.000 16.000 ZQA
$QA 20.980 26.358 101705.430 8.000 12.000 16.000 ZQA
$QA 20.990 26.382 101709.750 8.000 12.000 14.000 ZQA
Micro particule 1.0µm (µg/m3)
Temps(s)
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
0
100
200
300
400
500
600

Traitement d'images

Stratégie d'acquisition des images/vidéos



Traitement d'images

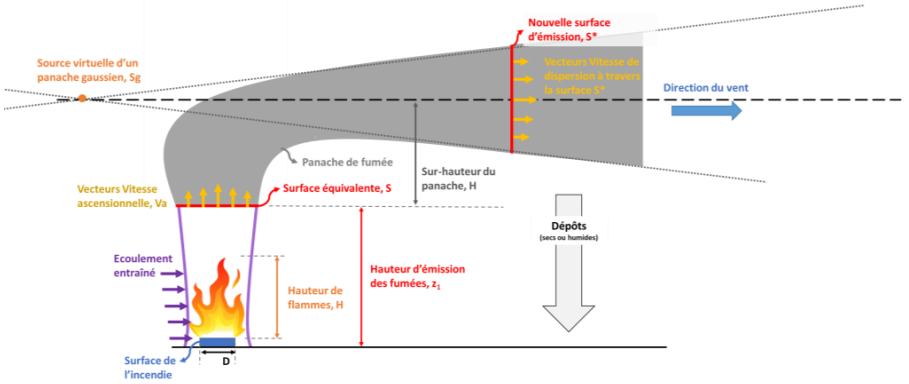
Stratégie d'acquisition des images/vidéos

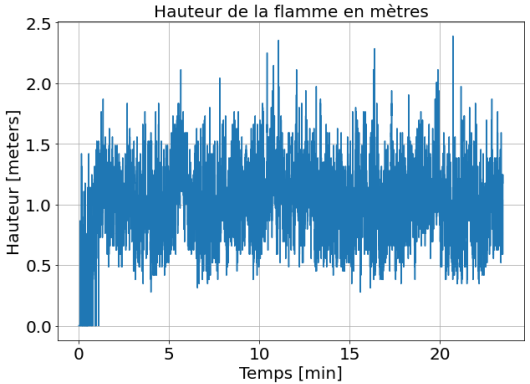
Traitement d'images

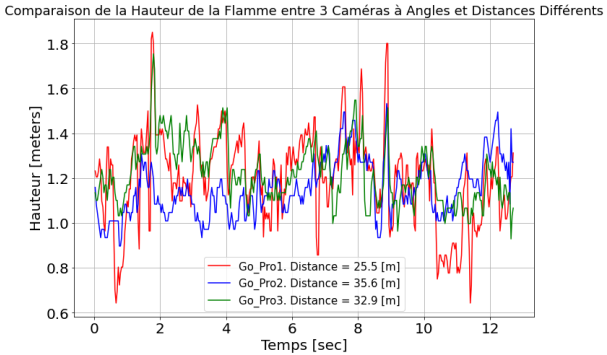
Détermination de la hauteur de flammes

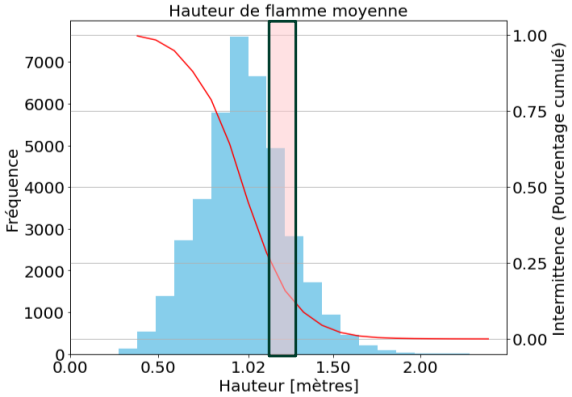
Approche cohérente

- pour différents échantillonnages
- pour des produits de termes sources connus





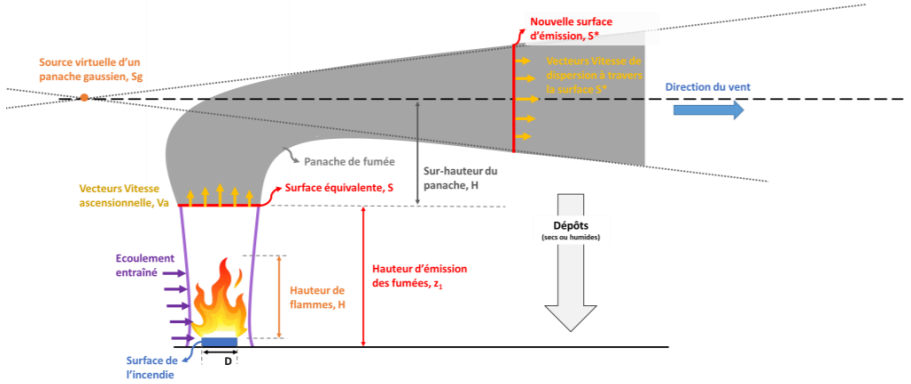


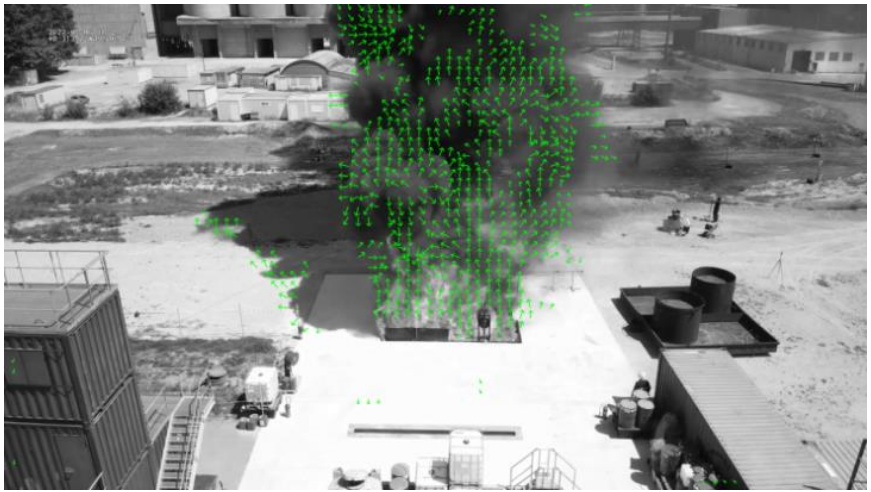


Traitement d'images

Détermination des vitesses ascenciennelles

Détermination des vitesses de dispersion

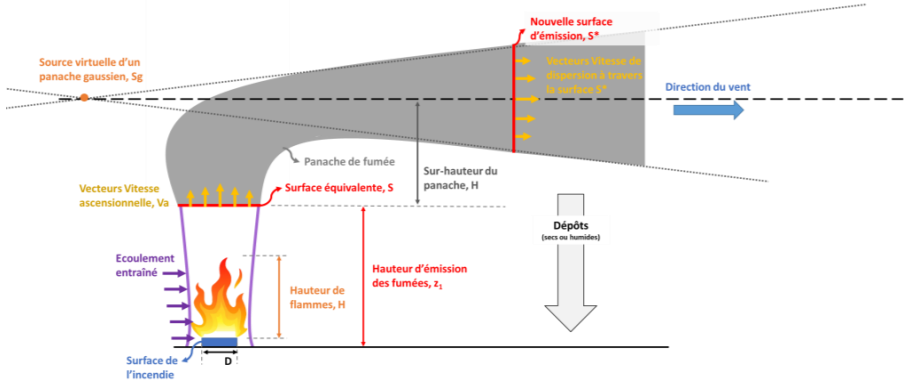


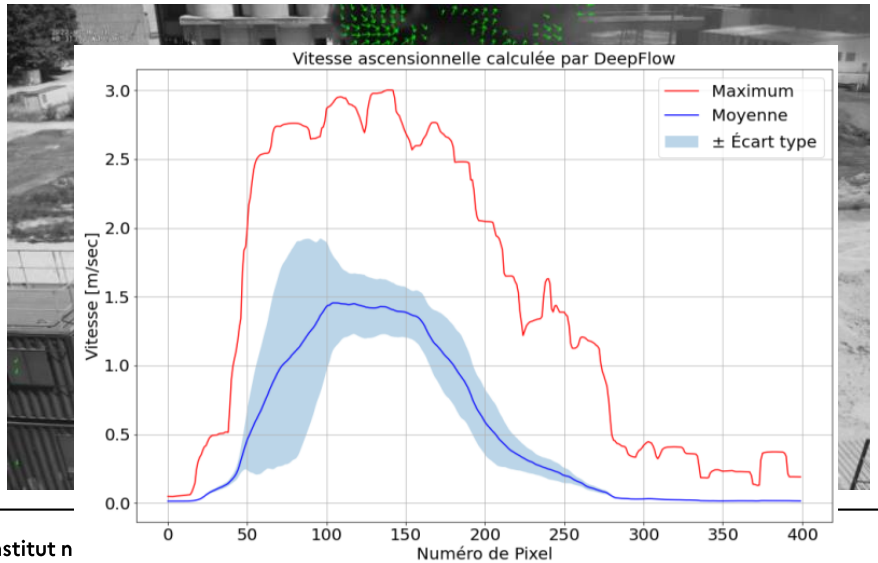


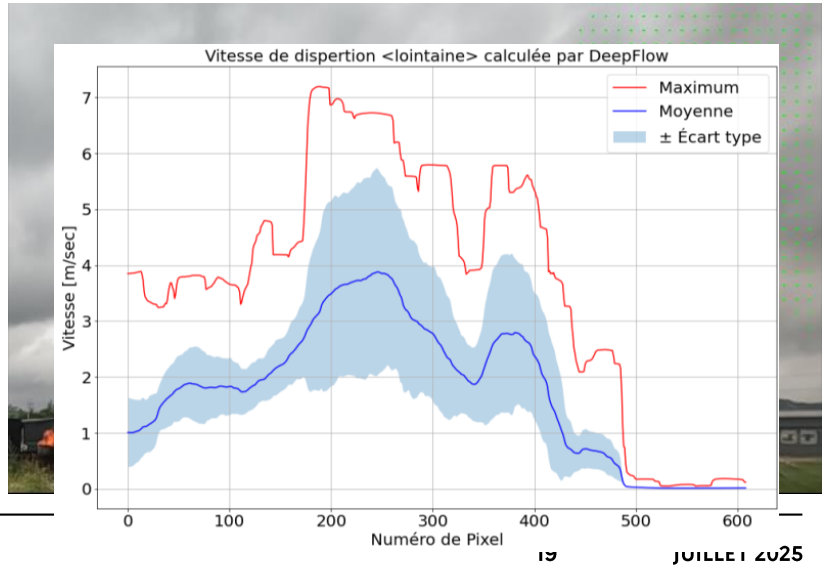
Traitement d'images

Détermination des vitesses ascenciennelles

Détermination des vitesses de dispersion



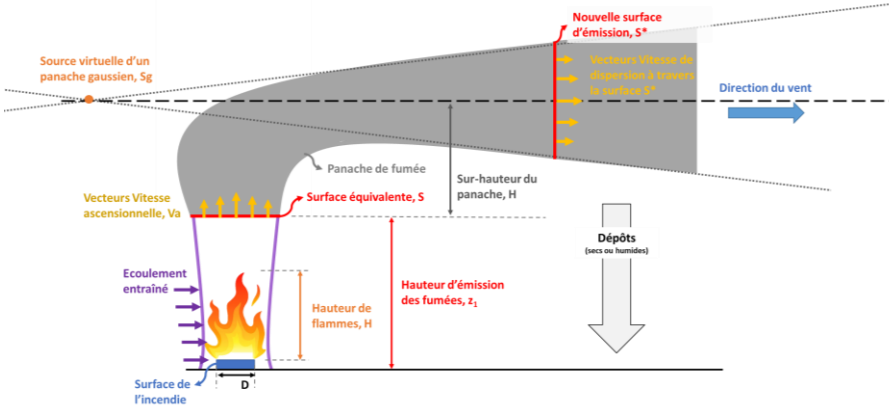


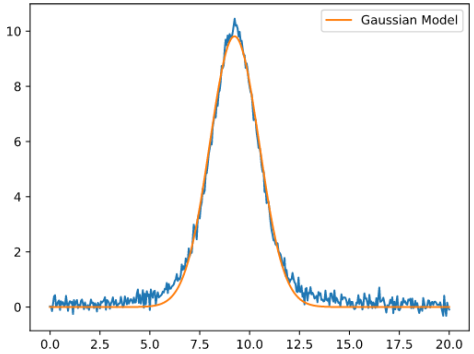


Utilisation des données

Modèle gaussien de la dispersion du panache

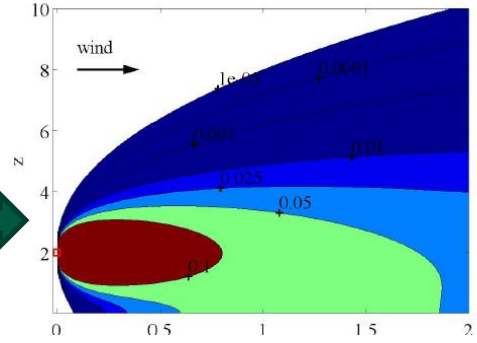
- Comparaison d'estimation de paramètres de modèles
- Régression par méthode des moindres carrés VS théorie bayésienne de

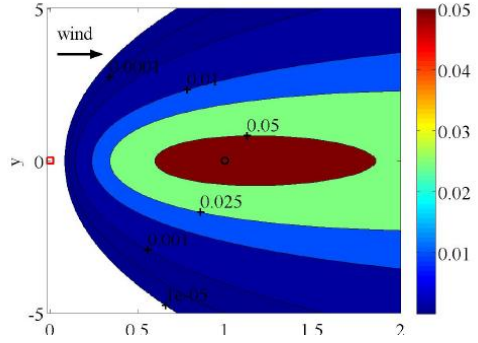




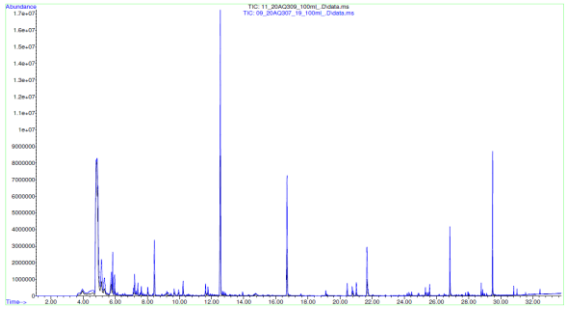
$$p(\theta \mid \text{data}) = \frac{p(\text{data} \mid \theta) \cdot p(\theta)}{p(\text{data})}$$

Posterior — Likelihood — Prior — Normalization





Résultats off-line

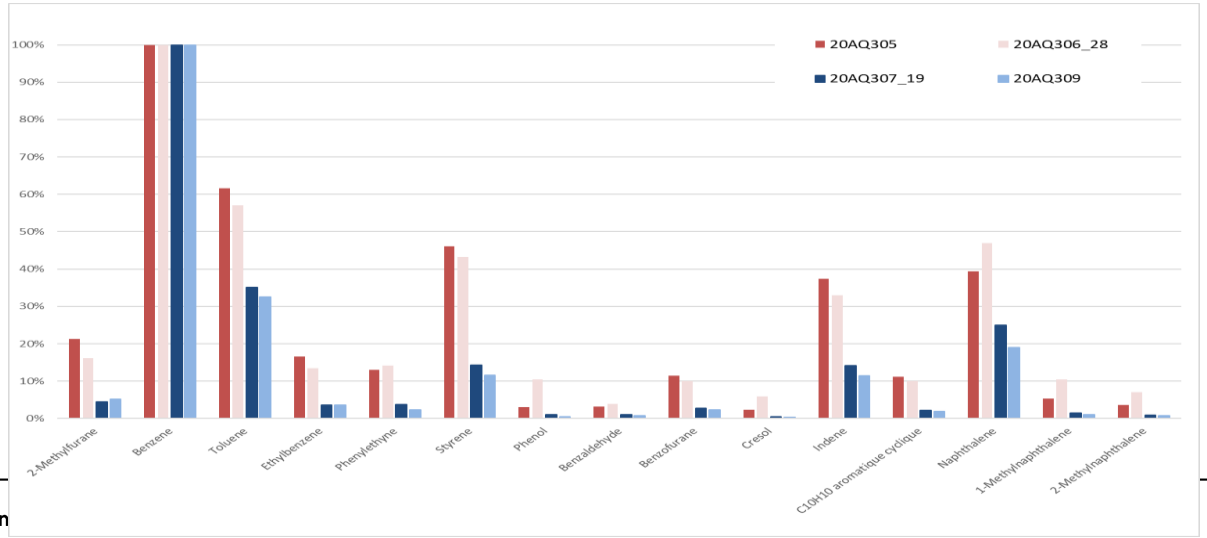


Résultats de la reproduction pour une source de pollution stable

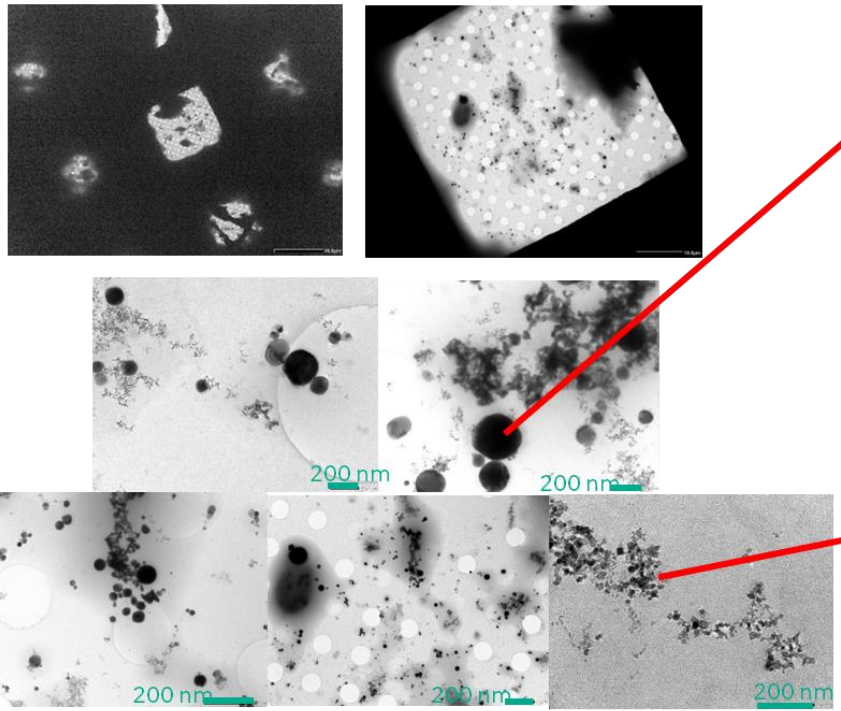
- Concentrations en Benzène ∈ [13 ; 101] µg.m^{-3}

Résultats comparables à un échantillonnage par un primo- intervenant

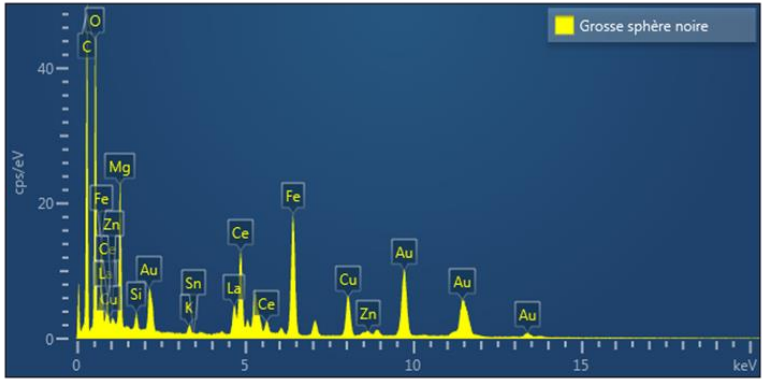
- **15 composés principaux identiques + benzène** (référence en semi-quatification)



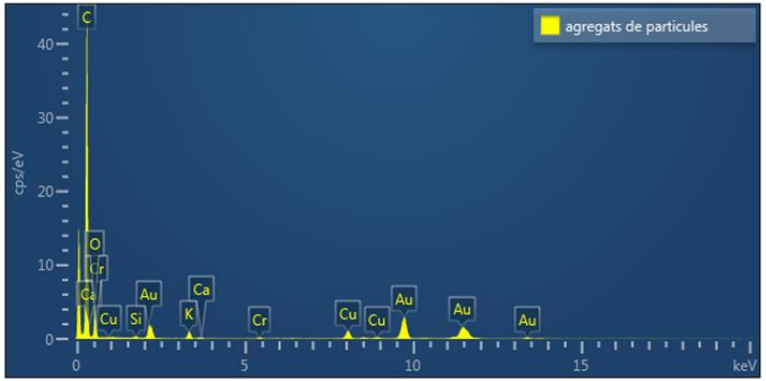
Résultats off-line



Particules de 200 nm, composées de alcalins et de métaux



Agrégats de particules de 1 nm composées de carbone : des suies



Conclusion & Perspectives

Approche holistique de la problématique de prediction de la dispersion de panache toxique

- **Prise en compte des besoins des données d'entrée et de comparaision pour les outils de modélisation**
- Implémentation d'une **stratégie de mesure**
- Rendu rapide après acquisition des données *via* un **modèle de dispersion Gaussien**

Une chaine de mesure adaptée

- **Conception de charges utiles** cohérentes avec les objectifs et stratégie de mesure
- Caractérisation d'un **terme source initial par acquisition d'image**
- **Signature et caractérisation des paanches** par analyse des phases gazeuse et particulaire
- Validation des sorties de la dispersion gaussienne par **comparaison avec les mesures temps-réel**

POC de caractérisation des panaches de dispersion par essaim de drones

- **Expérimentations menées jusqu'à présent à 4-5 drones**
- **REX pratique d'exploitation des données**

➔ **Outil à disposition pour la caractérisation de feux de grande ampleur**