**Dispersion atmosphérique d'un rejet de gaz lourd depuis une source élevée**

La compréhension physique de la dispersion atmosphérique des gaz lourds est fondamentale pour améliorer l’évaluation et la gestion des risques liés à des rejets accidentels.

La dispersion d’un gaz lourd est caractérisée par des effets de flottabilité et stratification, qui peuvent générer des conditions favorables à l’asphyxie, l’explosion et l’incendie. La proximité du milieu urbain et industriel amplifie l’impact potentiel des rejets accidentels sur les personnes et les structures alentours. Le panache d’un gaz plus dense de l’air s’étale au sol en produisant une écoulement stable et stratifié qui réduit sa dilution dans l’air. En conséquence, le valeur de seuil, relative aux conditions d’asphyxie, de toxicité, d'explosion et d'inflammabilité, peuvent être localement dépassées par des pics de concentration.

Le principal objectif scientifique du projet est d’améliorer la modélisation de la dynamique des rejets de gaz lourds au moyen d’expériences en soufflerie. Les expériences sont conçu pour mettre en évidence les différences avec un rejet de scalaire passif.

L’évaluation des risques lors de rejets de gaz lourds nécessite une estimation précise des intensités de fluctuation de concentration, ainsi que la prise en compte de leur interaction avec les fluctuations de vitesse. Pour cette raison, la caractérisation du panache est effectuée au moyen de un système de mesure couplé, qui permet de mesurer simultanément la concentration et la vitesse du fluide, en combinant deux techniques expérimentales, le détecteur par ionisation de flamme et l’anémomètre au fil chaud. Cette technique expérimentalement est sensible aux gradients de densité dans le panache et une procédure de calibration spécifique est établi dans le cas de gaz lourds (Chapitre 2).

Le scénario d’études a était défini en collaboration avec le partenaire industriel Air Liquide et il corresponde à l’émission depuis une grande unité de séparation d'air (ASU), qui émet du O₂ à une température de -40 °C dans la couche limite atmosphérique. Nous avons reproduit en soufflerie cette configuration à l’échelle, en générant une couche limite neutre développée sur une surface rugueuse. Les rejets de gaz lourds sont simulés expérimentalement par l'émission d'un mélange de dioxyde de carbone, d’air et d'éthane, le dernier étant utilisé comme traceur dans les mesures de concentration. Pour comparer l’expérience avec le rejet d’un scalaire passif, nous avons aussi utilisé un mélange d'air et d’éthane, dans les mêmes conditions.

L’analyse des données expérimentales (Chapitre 3) est focalisée sur la caractérisation du champ de vitesse et concentration, en analysant la moyenne et les moments d’ordre supérieur ; également on a estimé les lois de distribution de la concentration, les flux turbulentes de masse, les échanges d’énergie cinétique turbulente et les temps de mélange à grande et petite échelle.

Les paramètres obtenu par l’analyse de données expérimentales sont utilisés pour la validation de deux modelés opérationnels (Chapitre 4) : un modèle intégral (Ventjet, Miller et al., 2021), développé par Air Product et Air Liquide et un modèle Lagrangien (SLAM, Vendel et al., 2011), développé par l’équipe AIR de l’École Centrale de Lyon.

L’étude est complétée par l’investigation de la structure de la série temporelle de la concentration, en estimant le temps et la fréquence de dépassement de la seuil de concentration à travers un modèle analytique.

Les expériences en soufflerie ont montré que la trajectoire du panache de gaz lourd émis depuis une source élevée est affecté par les effets de flottabilité, alors que la dispersion turbulente n’est pas modifiée par rapport au cas d'un scalaire passif. Pour cette raison, les modèles opérationnels, précédemment validés pour un rejet du scalaire passif, reproduisent avec succès la dispersion atmosphérique d’un gaz lourd depuis une source élevée. Ces modèles prennent en compte les effets gravitationnels dans le déplacement vertical du centre du panache en reproduisant, avec une bonne précision, la trajectoire, la concentration moyenne et ces moments d’ordre supérieur obtenus dans les expériences en soufflerie.

Mots clés: Gaz lourds, Dispersion atmosphérique, Soufflerie, Mesures couplée, Modèle Intégral, Modèle Lagrangien.

**Atmospheric dispersion of a heavy gas release from an elevated source**

Understanding the physics of the atmospheric dispersion of heavy gases is essential to the assessment and management of risks associated to accidental releases of airborne pollutants. The release of gases heavier than air may produce favourable conditions to asphyxia, explosions and fires. The consequences of these releases are today further enhanced by the proximity of urban areas to industrial sites.

The density difference between the heavy release and the surrounding air induces buoyancy and stratification effects that have a major impact on the dispersion of these gases. Once released, the heavy gas ends up spreading to the ground, producing a stable stratified flow configuration, that inhibits the dilution of the heavy gas with the ambient air. Consequently, the hazard threshold concentration limits (related to asphyxia, toxicity, explosiveness, flammability) can be locally exceeded by peaks of concentration, increasing the risk for workers, people and structures.

The aims of this work is to investigate the turbulent dispersion dynamics of an elevated heavy gas release by means of wind tunnel experiments, enlightening its main differences compared to that of a passive scalar, and to test the ability of operational dispersion models in simulating this phenomena.

The risk assessment of heavy gas release requires to correctly estimate the intensity of the concentration fluctuations and their interactions with the velocity fluctuations. For this reason, we employ a coupled system, composed of a Flame Ionization Detector and a Hot-Wire Anemometry, to characterise the pollutant plumes downwind the source by measuring simultaneously the concentration and velocity filed. This experimental technique is sensitive to the density gradients within the plume and a specific calibration procedure is defined (Chapter 2).

The scenario of interest is defined with the industrial partner Air Liquide as the emission from an Air Separation Units (ASU) that releases O₂ at a temperature of -40°C in the atmospheric boundary layer. We simulate it with a scale model in our wind tunnel facility, where the inflow condition has been set to reproduce a fully developed turbulent boundary layer over a rough surface in neutral condition. From an elevated source we release a dense mixture of carbon dioxide and ethane, the latter used as a tracer in concentration measurements. Under the same flow and emission set-up we reproduce a passive scalar release, employing a mixture of air and ethane, comparing the dataset with the heavy gas one.

In the data analysis (Chapter 3), focus is set on the mean concentration field and its higher-order moments, the concentration probability distribution and the turbulent mass fluxes, characterising the spectra, the turbulent kinetic energy exchange, the mixing on large and small scale, as well as the temporal structure of the signal.

Finally, the data collected during the experiments on the heavy gas release is used to test and validate two operational dispersion models (Chapter 4). To that purpose we consider an integral model (Ventjet, Miller et al., 2021), developed by Air Product and Air Liquide, and a Lagrangian model (SLAM, Vendel et al., 2011), developed by the team AIR of the École Centrale de Lyon.

We complete the study by investigating the structure of the concentration time series, estimating the crossing time and rate of a concentration threshold by means of analytic models.

The wind tunnel experiments proved that the trajectory of the heavy gas plume, emitted from an elevated source, was affected by buoyancy effects, whereas its turbulent dispersion was unaltered compared to the passive scalar. For this reason, operational models, validated to simulate passive scalar release, have been employed with success to model the elevated heavy gas releases. These models considered the gravitational effect on the vertical displacement on the plume centreline reproducing with good agreement the trajectory, the mean concentration and the higher order moments of the wind tunnel experiments.

Key word: Heavy gas, Atmospheric dispersion, Wind tunnel, Coupled measurements, Integral and Lagrangian models.