



*18ème journée d'information du Cedre
La modélisation des pollutions accidentelles*

Les modèles de dispersion atmosphérique

*Thibauld Pénelon - INERIS / Direction des Risques Accidentels
Unité Dispersion Incendie Expérimentation et Modélisation - thibauld.penelon@ineris.fr*



*maîtriser le risque |
pour un développement durable*



Plan de l'exposé

Comment la dispersion atmosphérique est-elle modélisable ?

- Qu'est-ce que la dispersion atmosphérique ?
- Échelles de la dispersion atmosphérique
- Sources d'émissions accidentelles
- Conditions météorologiques et environnement

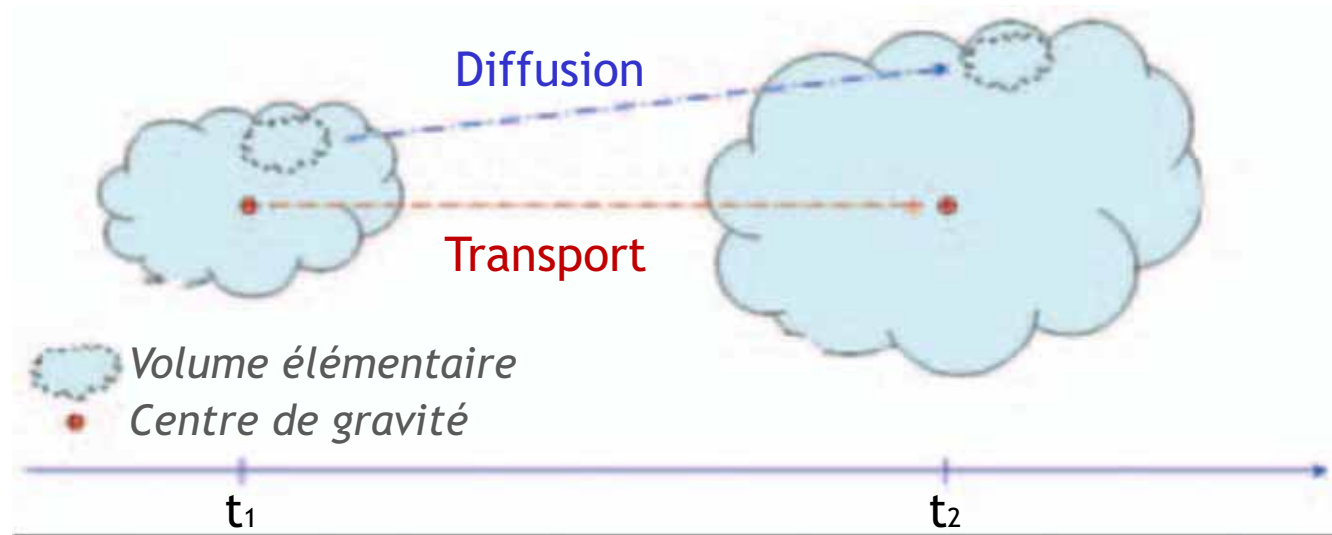
Quels modèles pour faire quoi ?

- Typologie des modèles
- Quelles applications, quelles limites ?
- Quelle validation ?

Après l'attaque du pétrolier Limburg, au large du Yémen, 2002 - source www.meretmarine.com

Qu'est-ce que la dispersion atmosphérique ?

C'est le **transport** et la **diffusion** d'une quantité de substance dans l'air



Représentation du processus de dispersion atmosphérique

(d'après F. Jourdain, 2007 - Techniques de l'Ingénieur)

Transport : par le vent, selon densité du nuage, vitesse initiale du rejet

Diffusion : par la turbulence atmosphérique (frottements à la surface, gradient thermique)
par la turbulence générée par les obstacles

Les échelles de la dispersion atmosphérique

Essais INERIS

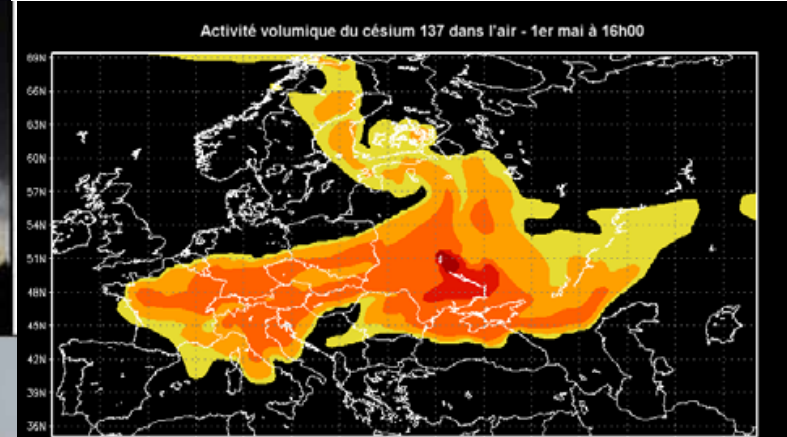


Essais INERIS

Buncefield - BBC

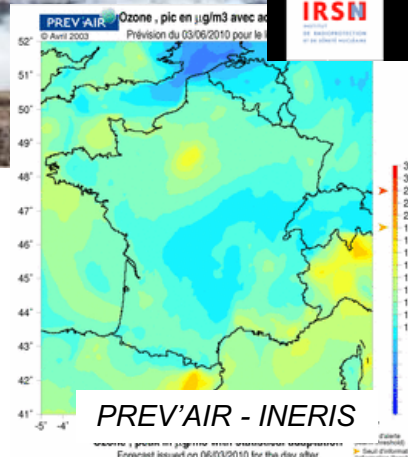


Tchernobyl - IRSN

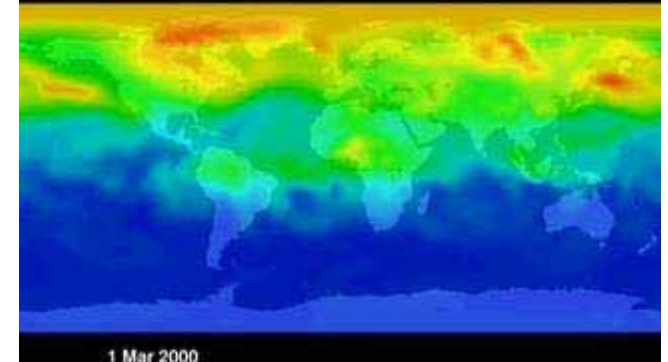


CO - NASA

Essais INERIS



IRSN



Micro
< 1000 m
sec - min

Locale
~ 100 m-50 km
min-heures

Meso (régionale)
~ 10-200 km
jours

Macro, Globale (Synoptique)
~ 100-100 000 km
mois-années

Les échelles de la dispersion atmosphérique

Essais INERIS

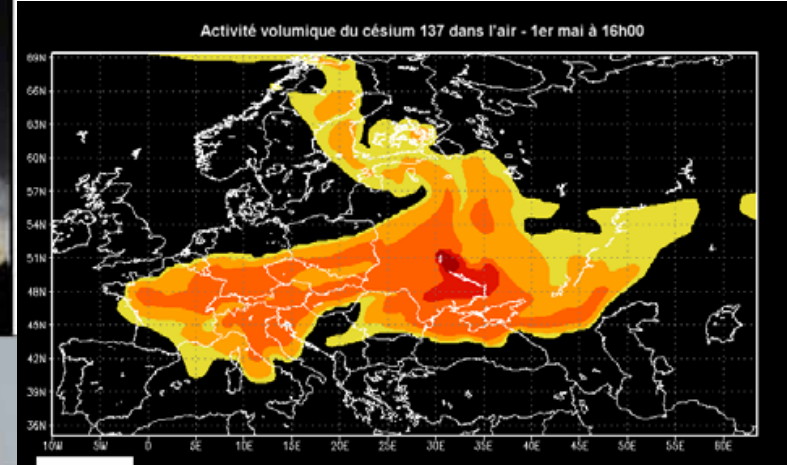
Buncefield - BBC

Tchernobyl - IRSN

DISPERSION ACCIDENTELLE DE TOXIQUES & INFLAMMABLES

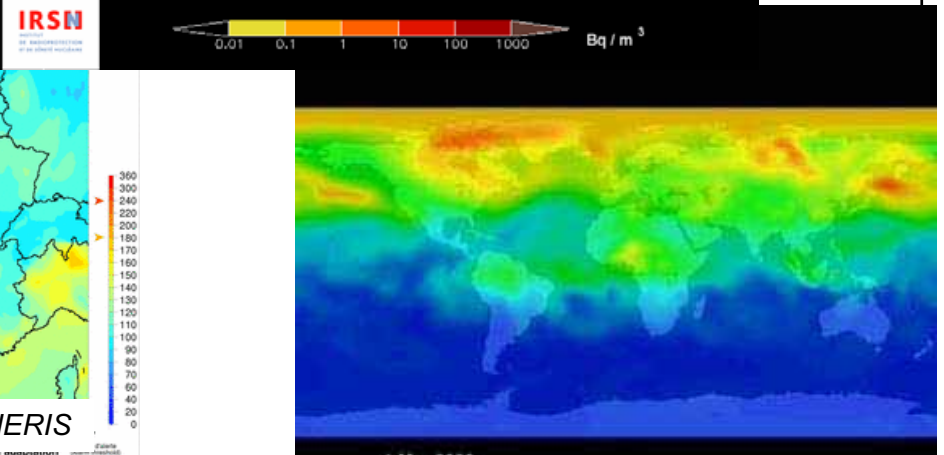
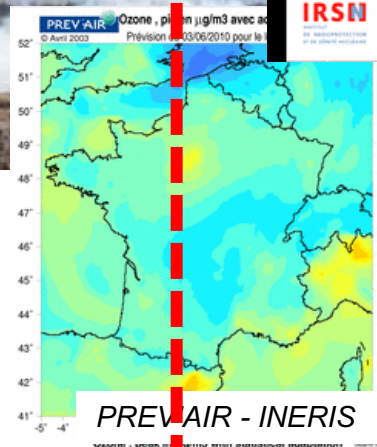


Essais INERIS



CO - NASA

Essais INERIS



Micro
< 1000 m
sec - min

Locale
~ 100 m-50 km
min-heures

Meso (régionale)
~ 10-200 km
jours

Macro, Globale (Synoptique)
~ 100-100 000 km
mois-années

Pour simuler une dispersion atmosphérique..

Une source d'émission à caractériser...

- Stockages à pression atmosphérique

- substance liquide à température ambiante

- (pression de vapeur saturante < 1 atm, à T_{amb} - ex. : styrène, xylène, benzène)

- gaz liquéfié par réfrigération (ex. : NH₃ à -43°C, GNL à -162°C)

⇒ REJET LIQUIDE ⇒ ÉMISSION DE VAPEURS



- Stockages sous pression

- gaz liquéfié sous pression (ex : GPL) ⇒ DIPHASIQUE

- gaz sous pression ⇒ GAZEUX



Navire transporteur de gaz équipé de citernes pressurisées

- Incendies émettant des fumées

⇒ REJET GAZEUX + suies

Feu de nappe de GNL sur l'eau
(Essais Gaz de France)



Pétrolier Limburg (10/2002)
Incendie de cargaison



Pour simuler une dispersion atmosphérique...

... des conditions atmosphériques à définir (1/5)

Couche limite atmosphérique

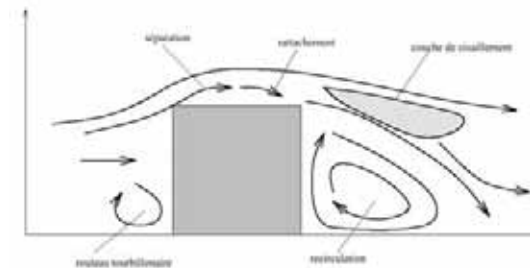
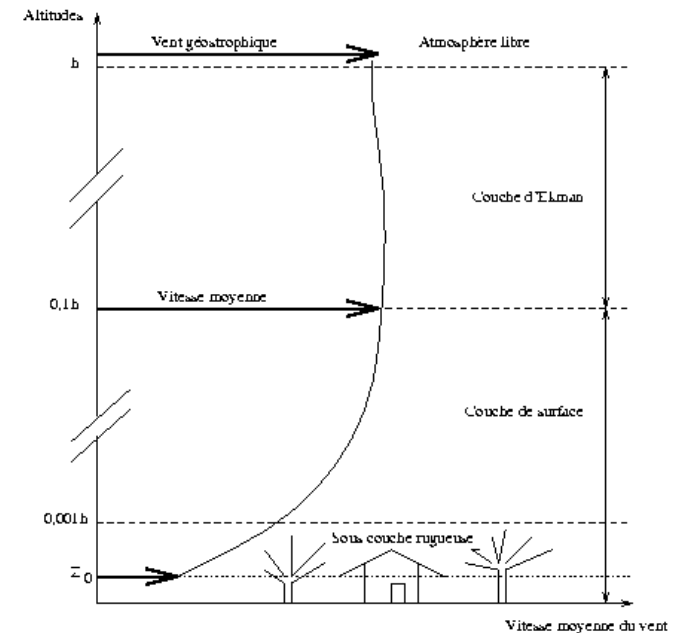
> couche de surface (0-100m) caractérisée par :

- Le champ de **vent moyen**
- Le champ de **température**
- L'activité **turbulente** (stabilité atmosphérique)

• Paramètres influencés par l'environnement

- ✓ Relief
- ✓ Obstacles
- ✓ Type de surface

(rugosité dépendant de l'état de mer, de l'occupation des sols)
(thermique)



Pour simuler une dispersion atmosphérique... ... des conditions atmosphériques à définir (2/5)

SUR TERRE

Quand?

Atmosphère neutre

Transition jour/nuit
Forte couverture nuageuse
Vent fort

Conséquence?

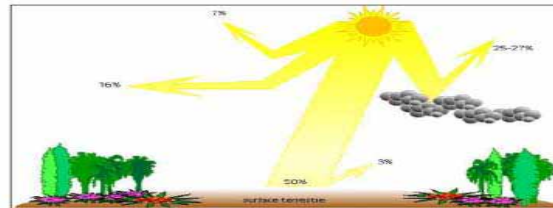
masse d'air déplacée
"reste à sa nouvelle place"

Turbulence moyenne
⇒ **dilution "normale"**
(Classe D de Pasquill)



Atmosphère instable (ou "convective")

Journée ensoleillée, vent faible
(sol chauffé par rayonnement solaire)



masse d'air déplacée + chaude
que son environnement
⇒ s'élève encore

Forte turbulence
⇒ **dilution forte**
(Classes A à C de Pasquill)



Atmosphère stable

Nuits claires, vent faible
Le sol refroidit plus vite que l'air



masse d'air déplacée + froide
que son environnement
⇒ revient à sa position initiale

Faible turbulence
⇒ **dilution faible**
(Classes E et F de Pasquill)



Pour simuler une dispersion atmosphérique...

... des conditions atmosphériques à définir (3/5)

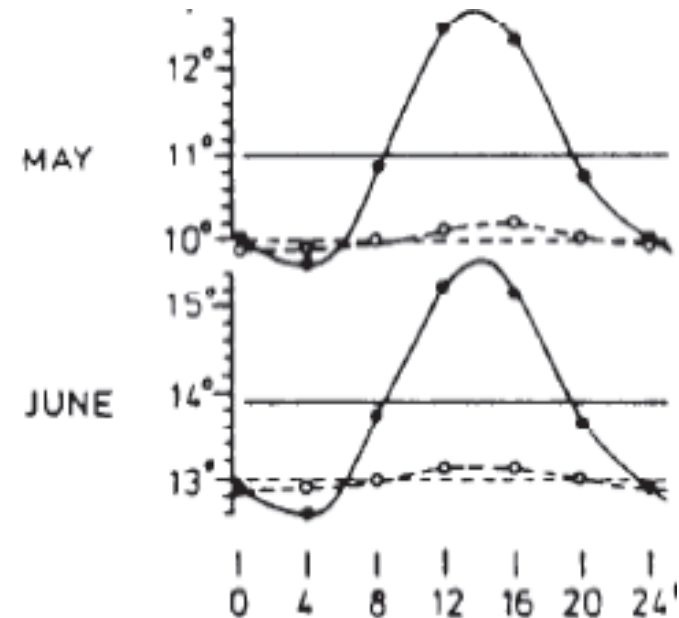
SUR MER

Sur mer, les variations de température de surface sont très faibles au cours du cycle diurne ($\Delta T < 1^\circ\text{C}$ sur mer ; ΔT jusqu'à 20°C sur terre !)

⇒ Gradient de température surface d'eau/air ambiant souvent plus faible que sur terre

⇒ Conditions de stabilité inversées / terre :

- modérément instable
 - plutôt la nuit
- faiblement stable
 - plutôt le jour
- neutre



----- Température eau

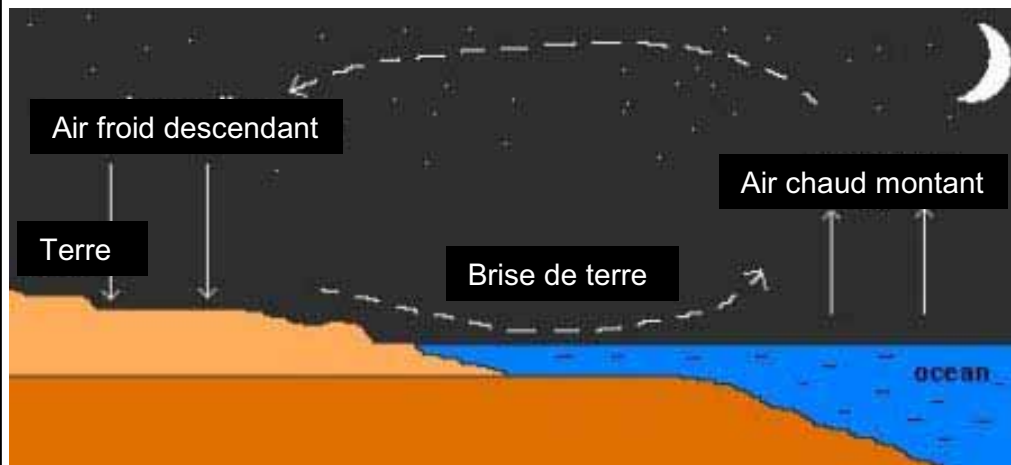
_____ Température air

Cycle diurne moyen en Mer du Nord (Hanna, 1984)

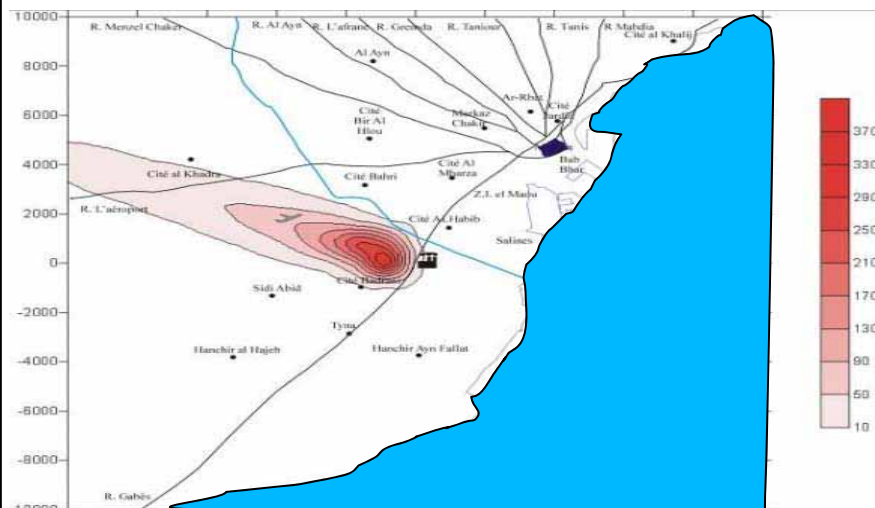
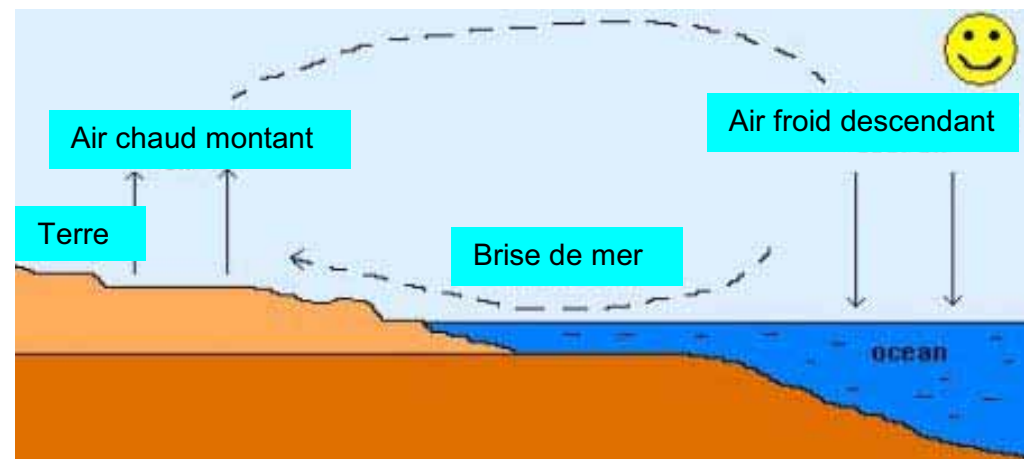
Pour simuler une dispersion atmosphérique...

... des conditions atmosphériques à définir (4/5): brises littorales

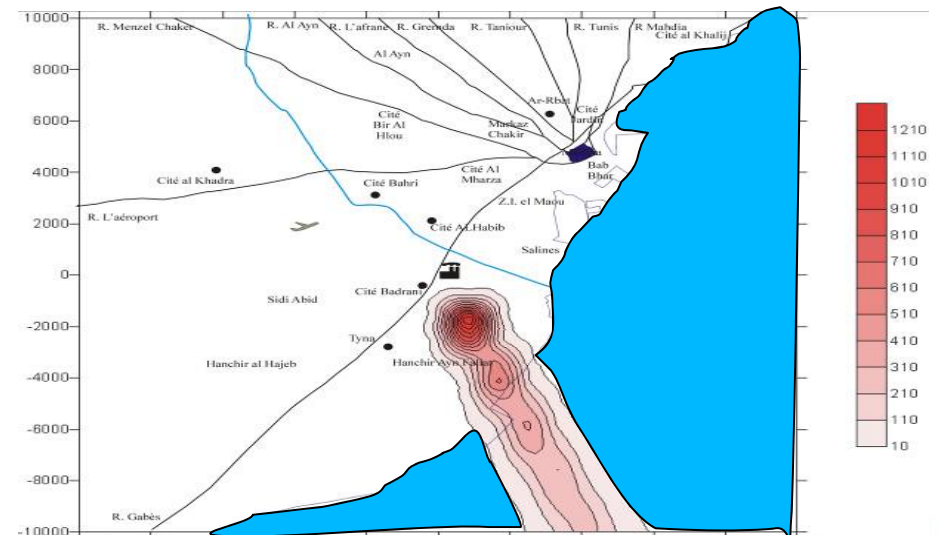
Brise de terre



Brise de mer



00h00 : Dispersion de SO₂ en conditions de brise de mer (Dahech et al. 2011)



15h00 : Dispersion de SO₂ en conditions de brise de terre (Dahech et al. 2011)

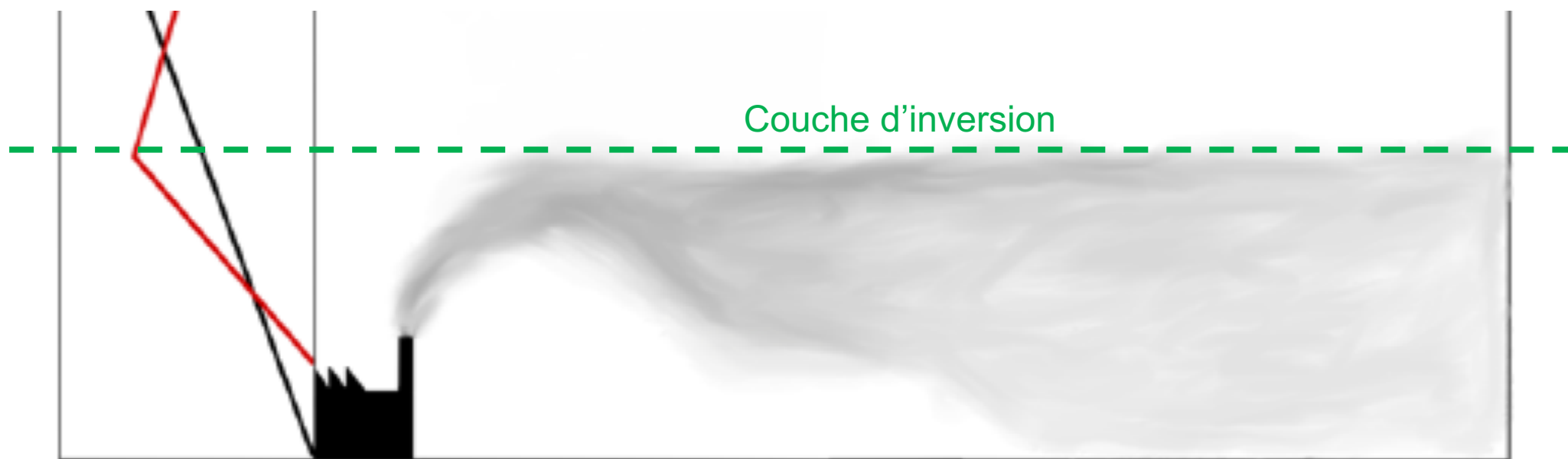
Pour simuler une dispersion atmosphérique...

... des conditions atmosphériques à définir (5/5): inversion thermique

La “couche d’inversion” est une zone où la température croît avec l’altitude (forte stabilité locale de l’atmosphère) :

Les gaz émis sont piégés entre le sol et l’inversion

(sauf si la vitesse du panache lui permet de la traverser – ex: fumées chaudes...)



Source : <http://courses.washington.edu/cee490/PlumeD4.pdf>

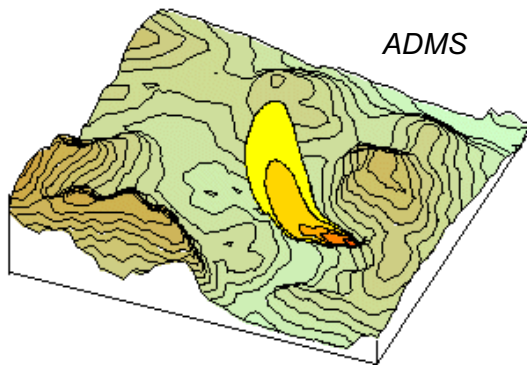
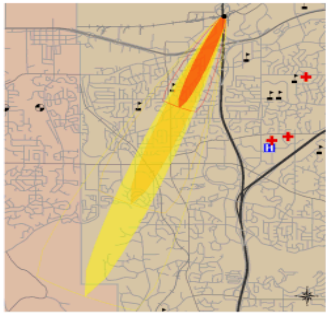
Quels modèles pour faire quoi ?

Pour la compréhension des phénomènes
Pour la protection des populations et des biens
Pour la protection de l'environnement

- Prévention : réduction des risques à la source
maîtrise de l'urbanisation
préparation des secours
- Urgence : adéquation des moyens d'intervention
pour protection des personnes
(équipages, secours, population)
pour protection des milieux
pour protection des biens



Typologie des modèles de dispersion: trois approches



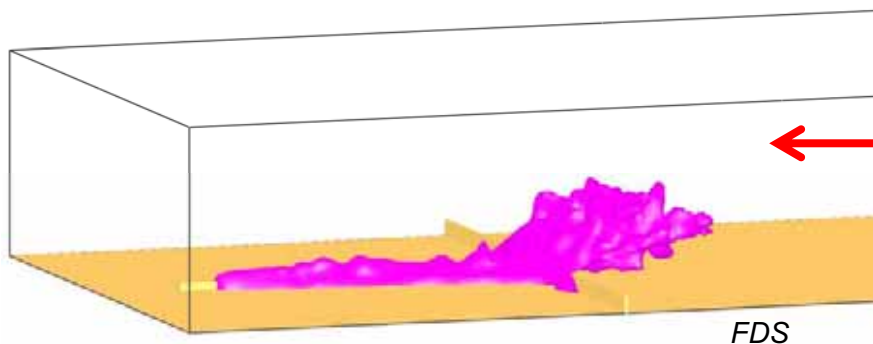
Modèle de type intégral (jet, gaz lourd...)

Résolution simplifiée des équations de la mécanique des fluides

Validité : $20 \text{ m} < d < 10 \text{ km}$

Ex : EFFECTS (TNO), SAFER (Safer Systems), PHAST (DNV Software)....

DocuView 5.3.13 - Apr 16 2009



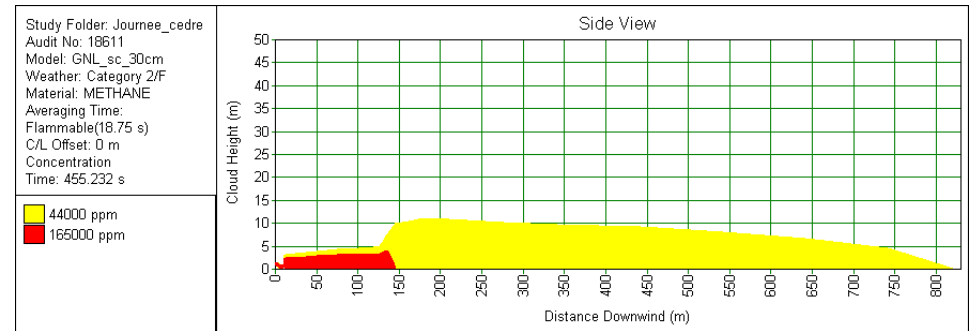
Complexité

Modèle gaussien (pour la dispersion passive)

Dispersion pilotée uniquement par la météo

Validité : $100 \text{ m} < d < 10 \text{ km}$

Ex : ALOHA (EPA/NOAA, USA), ADMS (CERC), INPUFF (EPA)...



PHAST

Modèle CFD (= Computational Fluid Dynamics)

Résolution + complète des équations de la mécanique des fluides

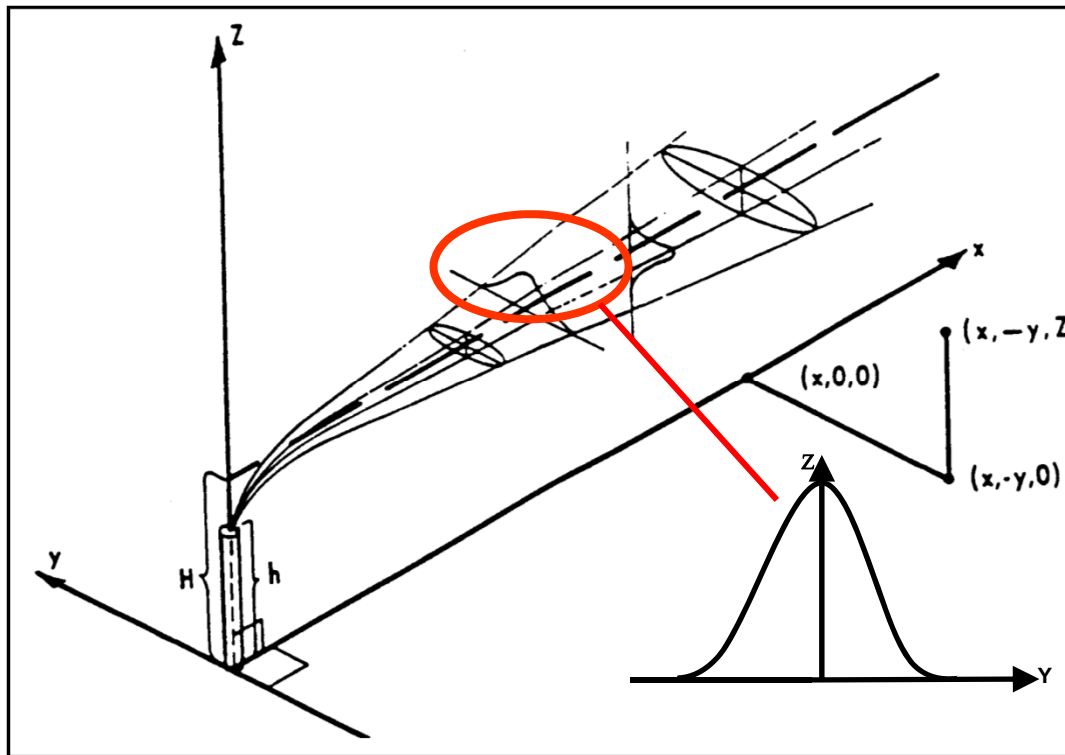
Validité : $1 \text{ cm} < d < 10 \text{ km}$

Ex : Code_Saturne (EDF), Flacs (GEXCON), PANEP (Fluidyn), FDS (NIST), Fluent (ANSYS)

13/19

Modèles gaussiens

Adaptés à la **dispersion passive** : polluant transporté par le vent et diffusé par la turbulence atmosphérique uniquement



- La concentration est calculée sur l'axe du panache
- Une loi Gaussienne (statistique) permet d'en déduire la concentration dans tout le panache
- fonction des écarts-types σ_y , σ_z caractéristiques de la turbulence atmosphérique, selon la **classe de stabilité**, l'environnement...

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \alpha \exp\left(-\frac{(z + z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Outils « intégraux »

Adaptés aux dispersions de type jet, gaz lourd, léger ou passif

Des outils d'une complexité intermédiaire

- Contiennent souvent un module de calcul de la source de rejet
- Intègrent différents modèles (modèle de jet, de gaz dense, voire léger...)
- Modèle gaussien conservé dans la phase finale (passive) de la dispersion

Des atouts semblables à ceux des modèles gaussiens

- Prise en compte de la couche d'inversion
- Bien validés sur terrain plat

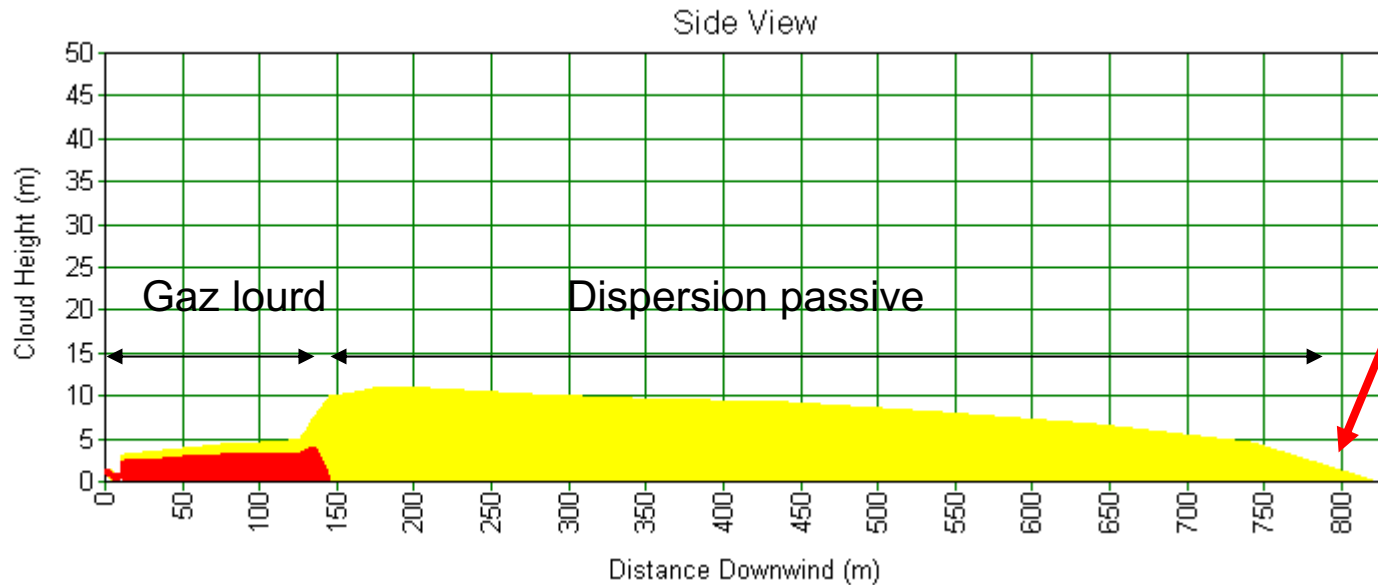
Des limitations (semblables aux modèles gaussiens)

- Météo constante, terrain plat (ni relief ni d'obstacles)
- Peu adaptés aux situations de vent très faible (diffusion moléculaire négligée)

Outils « intégraux » : exemple

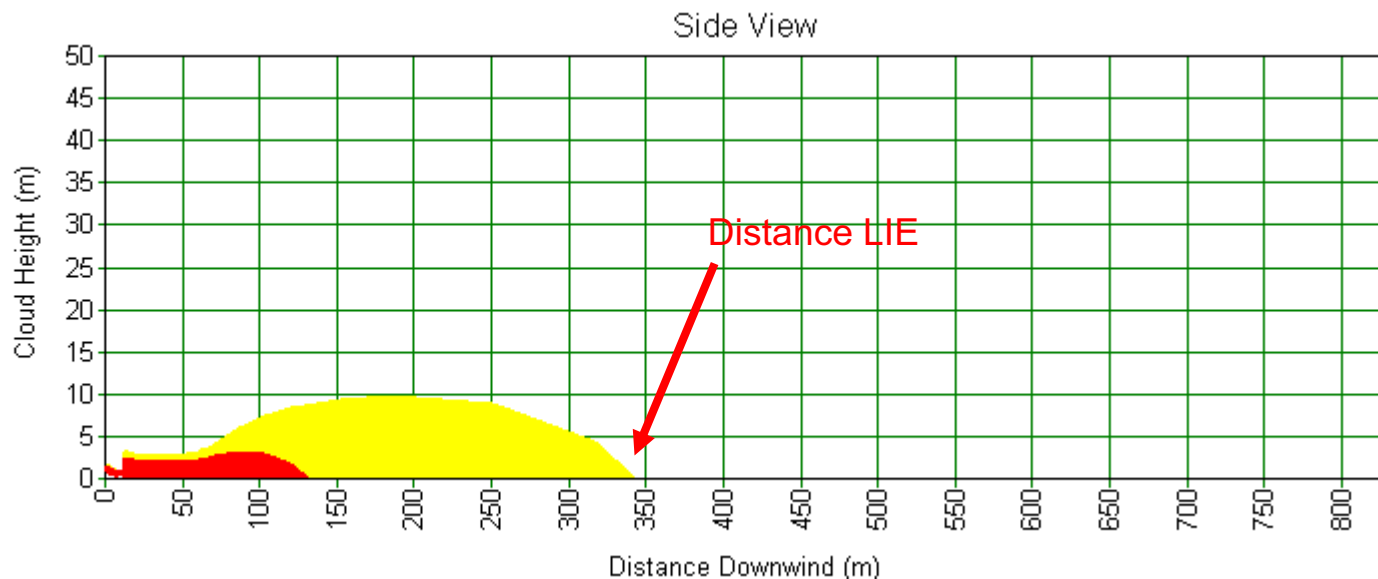
Study Folder: Journee_cedre
Audit No: 18611
Model: GNL_sc_30cm
Weather: **Category 2/F**
Material: METHANE
Averaging Time:
Flammable(18.75 s)
C/L Offset: 0 m
Concentration
Time: 455.232 s

44000 ppm
165000 ppm



Study Folder: Journee_cedre
Audit No: 18611
Model: GNL_sc_30cm
Weather: **Category 5/C**
Material: METHANE
Averaging Time:
Flammable(18.75 s)
C/L Offset: 0 m
Concentration
Time: 75.3584 s

44000 ppm
165000 ppm



Outils de type « CFD » (*Computational Fluid Dynamics*)

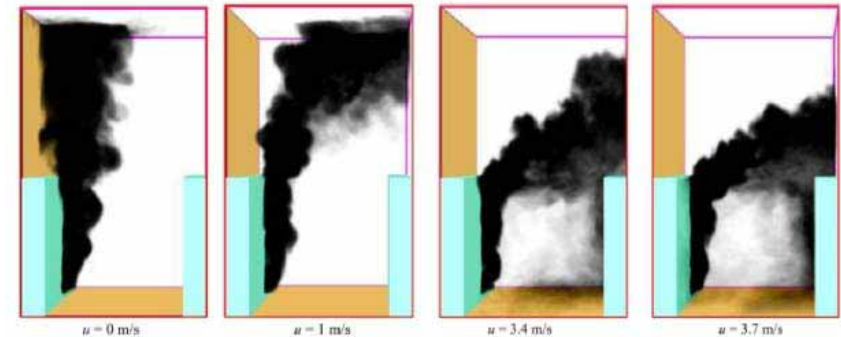
Des atouts spécifiques

- Prise en compte explicite des obstacles
- Prise en compte explicite du relief

⇒ Simulation d'environnements complexes

Plusieurs « sous-types »

- Eulérien (écoulement)-Lagrangien (dispersion)
- Eulérien-Eulérien
- Modèles de turbulence : RANS ($k-\varepsilon$, ...), LES, DNS



Source : Documentation code FDS

Limitations

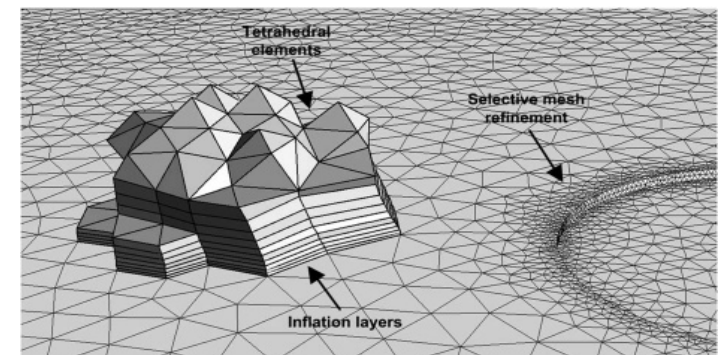
- Nombreux paramètres numériques et données d'entrée
- Temps de calcul important
- Précision dépendant de la méthode de résolution, du maillage utilisé, des conditions aux limites, du choix des modèles de turbulence...

→ Coûteux



forte variabilité des résultats
en dispersion atmosphérique

> Prudence dans une démarche de sécurité par prédiction!



Exemple de maillage complexe (Sklavounos & Rigas, 2006)

Validation des outils de calcul de dispersion atmosphérique ?

Critères statistiques pour validation par confrontation avec des essais

$$FB = \frac{(\bar{C}_o - \bar{C}_p)}{0.5(\bar{C}_o + \bar{C}_p)}$$

(Hanna et Chang, 2004)

$$MG = \exp(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p})$$

$$NMSE = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{\bar{C}_o \bar{C}_p}$$

$$VG = \exp\left[\overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2}\right]$$

Quand un modèle est idéal...

$$FB = NMSE = 0$$

$$MG = VG = 1$$

$$FAC2 = 100\%$$

Quand un modèle est « bon »...

$$-0.3 < FB < 0.3$$

$$0.7 < MG < 1.3$$

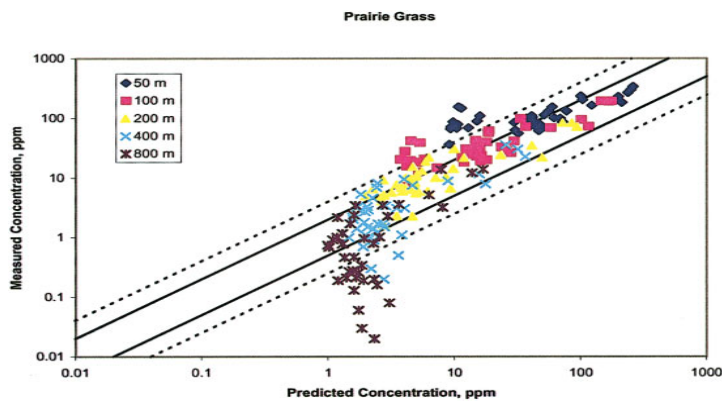
$$NMSE < 0.5$$

$$VG < 1.6$$

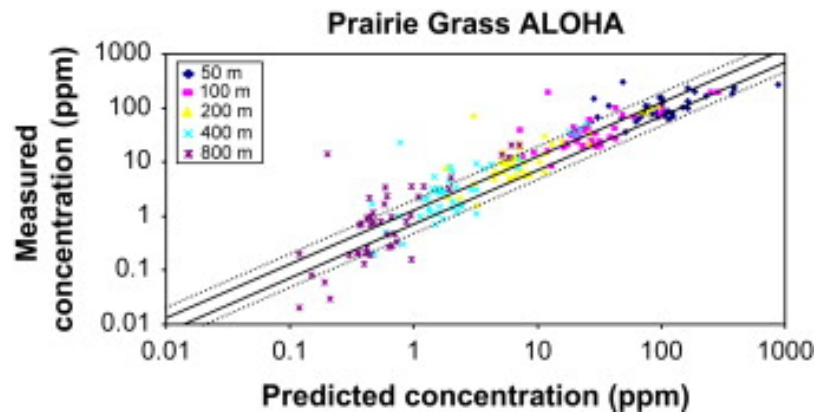
$$0.5 < FAC2$$

C_p : prédictions
 C_o : observations

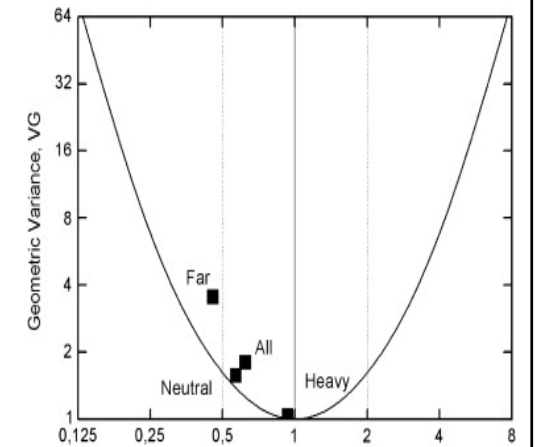
FAC2 = fraction of data that satisfy $0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0$



(Dharmavaram et al., 2005)



(Mazzoldi, 2008)



(Kisa et Jelemensky, 2009)

18/19

Vers la dispersion plus lointaine...

Modélisation de la dispersion aérienne en champ lointain (> qq km)

- Évolution spatio-temporelle des conditions météorologiques
- Relief, hétérogénéités de surfaces
- Approches eulériennes, lagrangiennes ou mixtes
- Nombreux modèles, souvent dédiés à la simulation des émissions chroniques et de la qualité de l'air (à gde échelle : poussières du Sahara, radionucléides, volcans...)

⇒ Couplages possibles entre les échelles locale < régionale < globale

Simulation de l'évaporation d'une nappe de Xylènes avec couplage MOTHY-PERLE (Météo-France)

