



13ème journée d'information du Cedre
Pollutions accidentelles par substances dangereuses

La modélisation aérienne

Mécanismes de dispersion et simulation

Thibault Pénelon – INERIS / Direction des Risques Accidentels
Unité Explosion-Dispersion - thibault.penelon@ineris.fr



*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Plan de l'exposé

Introduction

- Dispersion d'une substance dangereuse dans l'atmosphère

Dispersion atmosphérique - Principaux mécanismes et éléments influents

- Caractérisation de la source de rejet
- Effet de densité de la substance rejetée
- Effets météorologiques et orographique

Dispersion atmosphérique - Modèles

- Gaussiens
- Intégraux
- Complexes (CFD)

Introduction (1/3)

Dispersion d'une substance dans l'atmosphère



ÉMISSION

Source de rejet (accidentelle)
ou « terme source »

- jet liquide ou gazeux
- rejet massif instantané (liq/gaz)
- nappes évaporantes
- fumées d'incendie...

Atmosphère (air humide)

- conditions météorologiques
- état de la mer (vagues)
- présence de côtes...

**TRANSPORT
DIFFUSION**
(Dispersion)

Effets toxiques
(inhalation, ingestion)

Effets thermiques
(inflammation)

Effets de pression
(explosion)

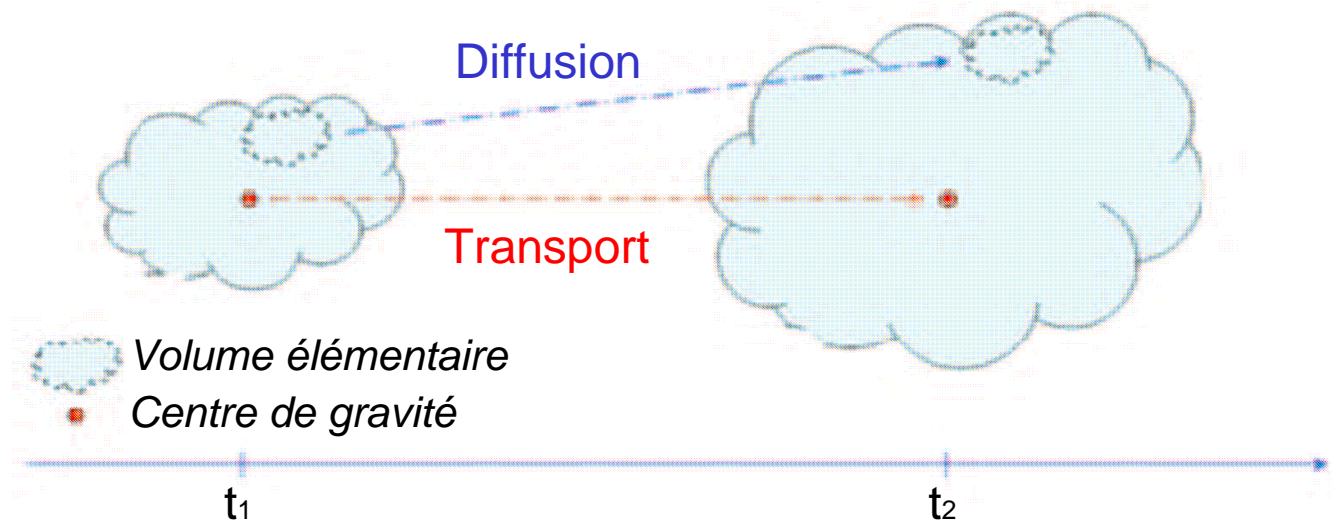
Cibles/Enjeux

- Humaines (secours, population côtière...)
- Environnementales

Introduction (2/3)

Dispersion d'une substance dans l'atmosphère

Transport et diffusion



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)



Introduction (3/3)

Dispersion d'une substance dans l'atmosphère

Principaux paramètres influents

- Profil de vent & rugosité de surface
- Gradient thermique (stabilité atmosphérique)
- Obstacles & relief (navires, zone côtière...)
- Caractéristiques de la substance et de la source de rejet



Dispersion d'une substance dans l'atmosphère

Principaux paramètres influents

- Profil de vent & rugosité de surface
- Gradient thermique (stabilité atmosphérique)
- Obstacles & relief (navires, zone côtière...)
- **Caractéristiques de la substance et de la source de rejet**

Caractérisation de la sources de rejet (1/2)

Types d'émissions

- Stockages à pression atmosphérique
 - substance liquide à température ambiante (pression de vapeur saturante $< 1 \text{ atm}$, à T_{amb} - ex. : styrène, xylène, benzène)
 - gaz liquéfié par réfrigération (ex. : NH_3 à -43°C , GNL à -162°C)

⇒ REJETS LIQUIDES



Navire transporteur de gaz équipé de citernes pressurisées

- Stockages sous pression
 - gaz liquéfié sous pression (ex : GPL) ⇒ **DIPHASIQUES**
 - gaz sous pression ⇒ **GAZEUX**

- Incendies émettant des fumées

⇒ REJETS GAZEUX + suies

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

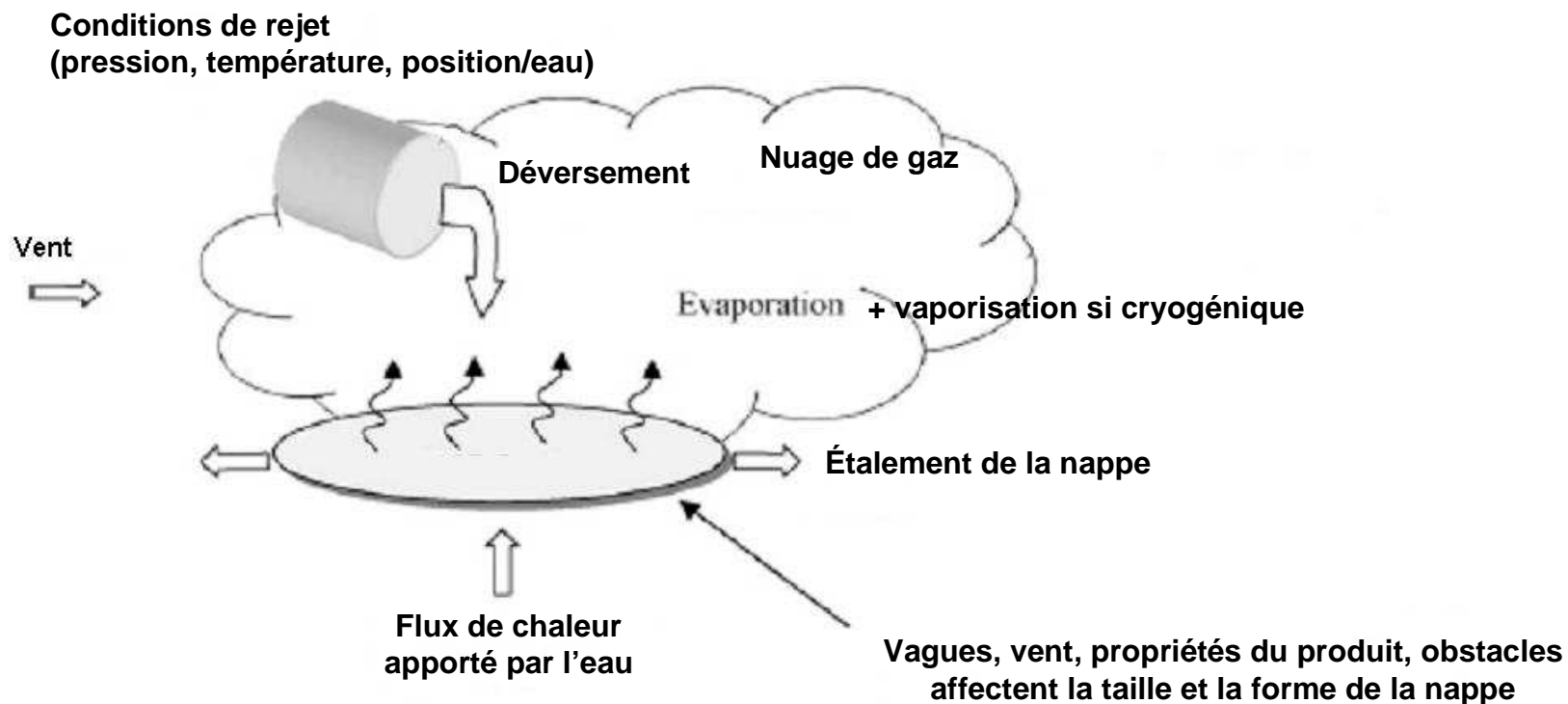


Pétrolier Limburg (10/2002)
Incendie de cargaison



Caractérisation de la sources de rejet (2/2)

- Rejets instantanés (ouverture brutale d'un confinement)
- Rejets continus (fuite durable sur confinement)



(D'après Luketa-Hanlin, 2006)

Illustration - Rejet de GNL dans l'eau



Effets de densité des produits rejetés

> Gaz passif

Origine?

- Gaz de même densité que l'air
- Gaz très dilué dans l'air
- Pas d'effet de jet

Conséquences?

- Transport à la vitesse du vent
- Dilution par la turbulence atmosphérique

> Gaz dense

- Gaz de forte densité à T_{amb} (Cl_2 , $COCl_2...$)
- Rejet diphasique (GPL pressurisé)
- Gaz froid

- Effets de gravité
⇒ Effondrement
⇒ Dilution latérale accrue
- Frottement à la surface
- Fortes concentrations à la surface

> Gaz léger

- Gaz de densité moins grande que l'air (H_2 , CH_4 , NH_3 gazeux...)
- Gaz chaud (fumées d'incendie...)

- Élévation
- Dilution augmentée par cisaillement du vent
- Concentrations plus faibles à la surface



Illustration - Rejet d'ammoniac liquéfié

- Film : Rejet d'ammoniac en champ libre (sur terrain plat)

Essais INERIS, 1997 (film essai 2)

TRIAL N°2

Horizontal free jet \varnothing 20 mm

ESSAI N°2

Jet libre horizontal \varnothing 20 mm



Dispersion d'une substance dans l'atmosphère

Principaux paramètres influents

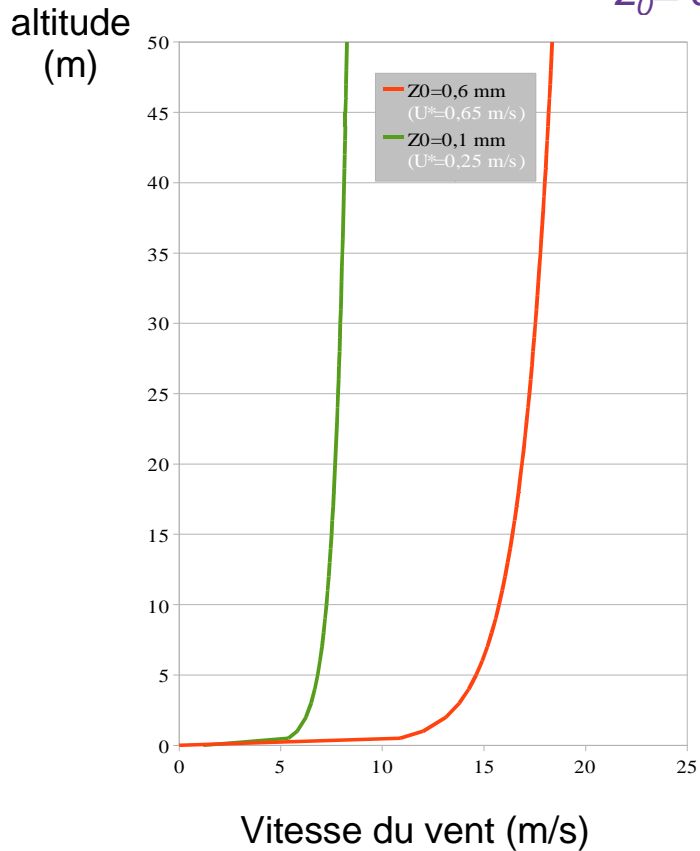
- Profil de vent & rugosité de surface
- Gradient thermique (stabilité atmosphérique)
- Obstacles & relief (navires, zone côtière...)
- Caractéristiques de la substance et de la source de rejet

La vitesse du vent et la rugosité de surface (de la mer)

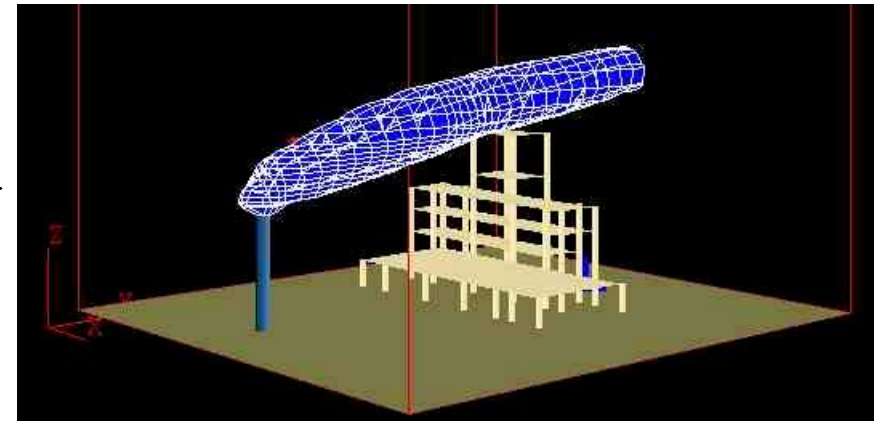
Profil vertical de vent typiquement logarithmique / dépend de la rugosité de surface

La rugosité d'une surface d'eau dépend des vagues, donc du vent

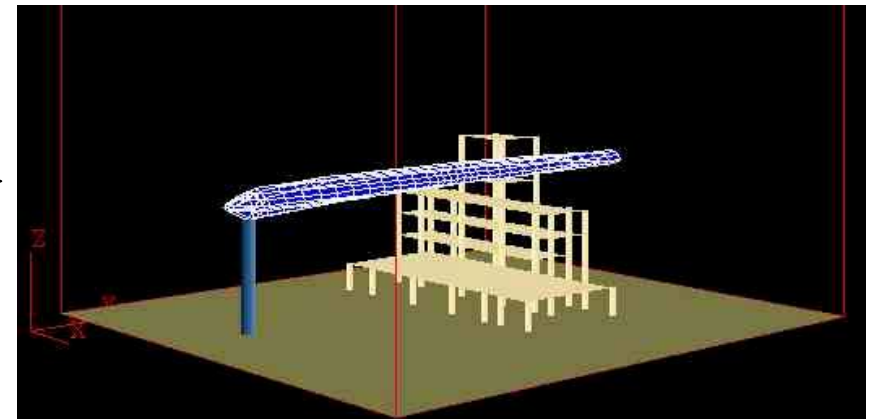
$z_0 = 0.1 \text{ à } 0.6 \text{ mm}$ selon Brutsaert (1982)



3 m/s



10 m/s



Plus le vent est fort, plus la dilution est importante (effet de cisaillement)



Dispersion d'une substance dans l'atmosphère

Principaux paramètres influents

- Profil de vent & rugosité de surface
- Gradient thermique (stabilité atmosphérique)
- Obstacles & relief (navires, zone côtière...)
- Caractéristiques de la substance et de la source de rejet

La stabilité atmosphérique \Leftrightarrow gradient thermique vertical

- P_{atm} diminue avec l'altitude : refroidissement de l'air

Quand?

Atmosphère neutre

Transition jour/nuit
Forte couverture nuageuse
Vent fort

Conséquence?

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

Turbulence moyenne
 \Rightarrow dilution "normale"
(Classe D de Pasquill)

Atmosphère instable (ou "convective")

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

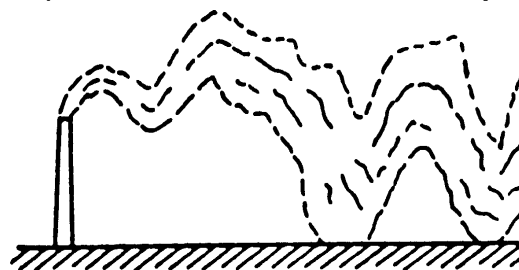
masse d'air déplacée + chaude
que son environnement

\Rightarrow s'élève encore

Forte turbulence

\Rightarrow dilution forte

(Classes A à C de Pasquill)



Atmosphère stable

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

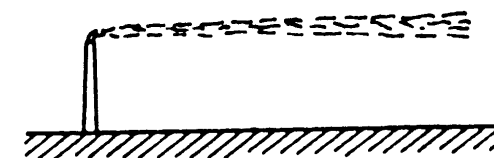
masse d'air déplacée + froide
que son environnement

\Rightarrow revient à sa position initiale

Faible turbulence

\Rightarrow dilution faible

(Classes E et F de Pasquill)





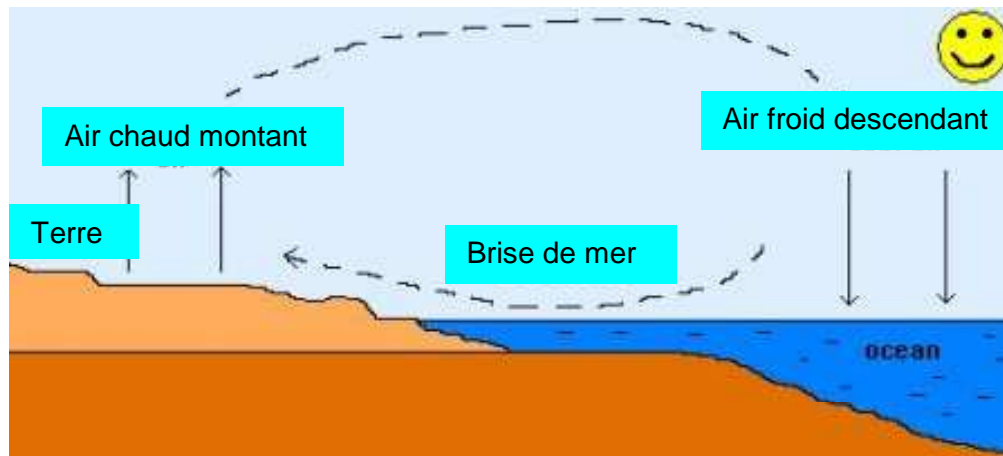
Dispersion d'une substance dans l'atmosphère

Principaux paramètres influents

- Profil de vent & rugosité de surface
- Gradient thermique (stabilité atmosphérique)
- **Obstacles & relief (navires, zone côtière...)**
- Caractéristiques de la substance et de la source de rejet

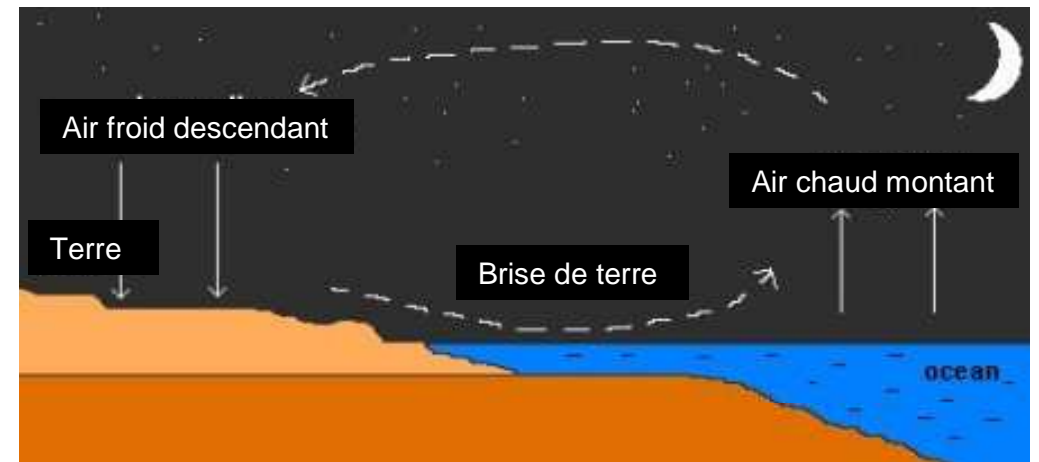
Zone côtière : brises littorales

Turbulence d'origine thermique



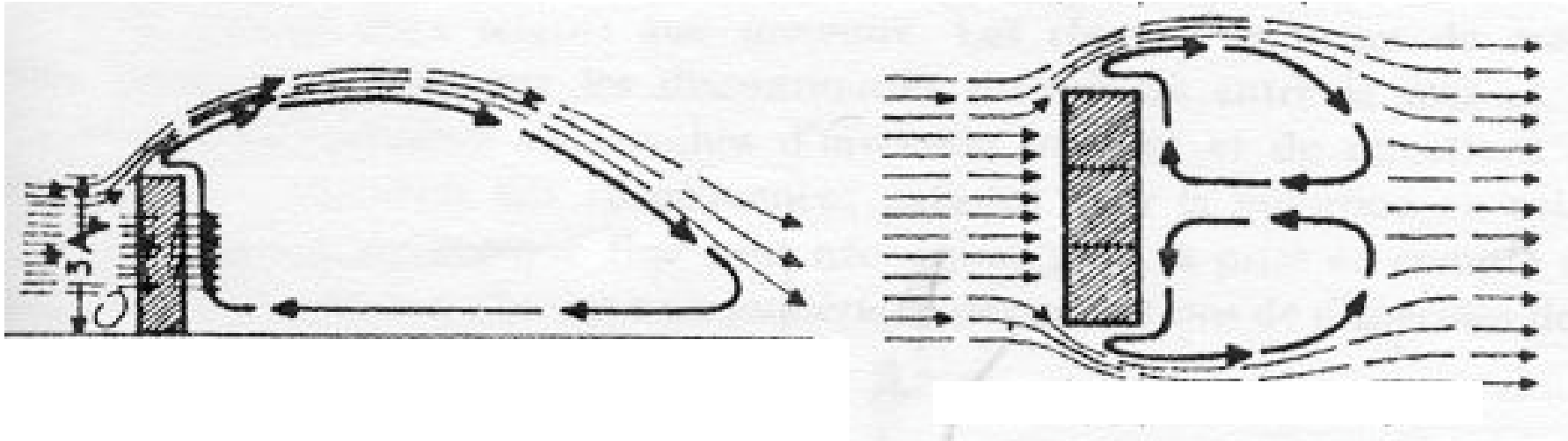
Brise de mer

Brise de terre



Présence d'un obstacle (ex. : navires à proximité)

Turbulence d'origine mécanique - Effets de recirculation



Essais INERIS, 1997 - Impact sur un obstacle (film essai 5)



Modèles de dispersion accidentelle dans l'air (champ « proche »)

GAUSSIEN

La dispersion est pilotée **uniquement** par la météo !

Validité

100 m < d < 10 km

INTEGRAL

Équations de la mécanique des fluides très simplifiées !

Validité

20 m < d < 10 km

« 3D » ou CFD

Équations de la mécanique des fluides « moins » simplifiées ...

Validité

1 cm < d < 10 km

Modèles gaussiens

Principe

- Solution de l'équation de dispersion = loi de distribution gaussienne

Applications

- Gaz passifs
- Situations d'urgence

Hypothèses simplificatrices et limitations

- Néglige la diffusion moléculaire
- Champ de vent uniforme (vitesse et direction) dans le temps et l'espace
- Pas d'obstacle / pas de relief...
- Inadapté pour les gaz lourds

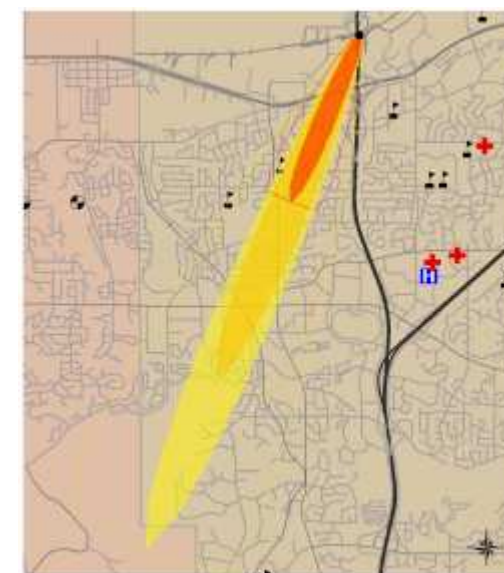
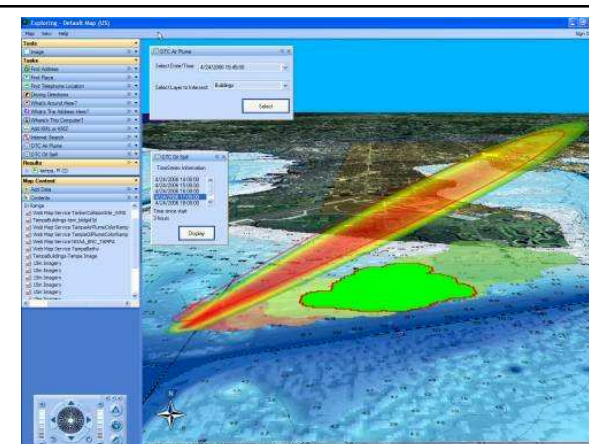
Exemples

ALOHA (EPA/NOAA, USA) (+ *modèle intégral de gaz dense (DEGADIS)*)

EPIcode (Homann Associates, Inc.)

INPUFF (EPA) (*multisource + adaptation pour gaz légers*)

...



Modèles intégraux

Principe

- Résolution simplifiée des équations de la mécanique des fluides,
- Choix des paramètres de calage pour obtenir des distances « conservatives »

Applications

- Gaz neutres, gaz denses, et parfois les gaz légers

Hypothèses

- Intègre différents modèles (modèle de jet, de gaz dense, de gaz léger...)
- Modèle gaussien conservé dans la phase finale (passive) de la dispersion

Limitations

- Approche paramétrique prudente
- Limitations des modèles gaussiens (météo constante, ni relief ni d'obstacles)
- Inadapté pour des rejets faible vitesse / vent faible (diffusion moléculaire négligée)

Exemples

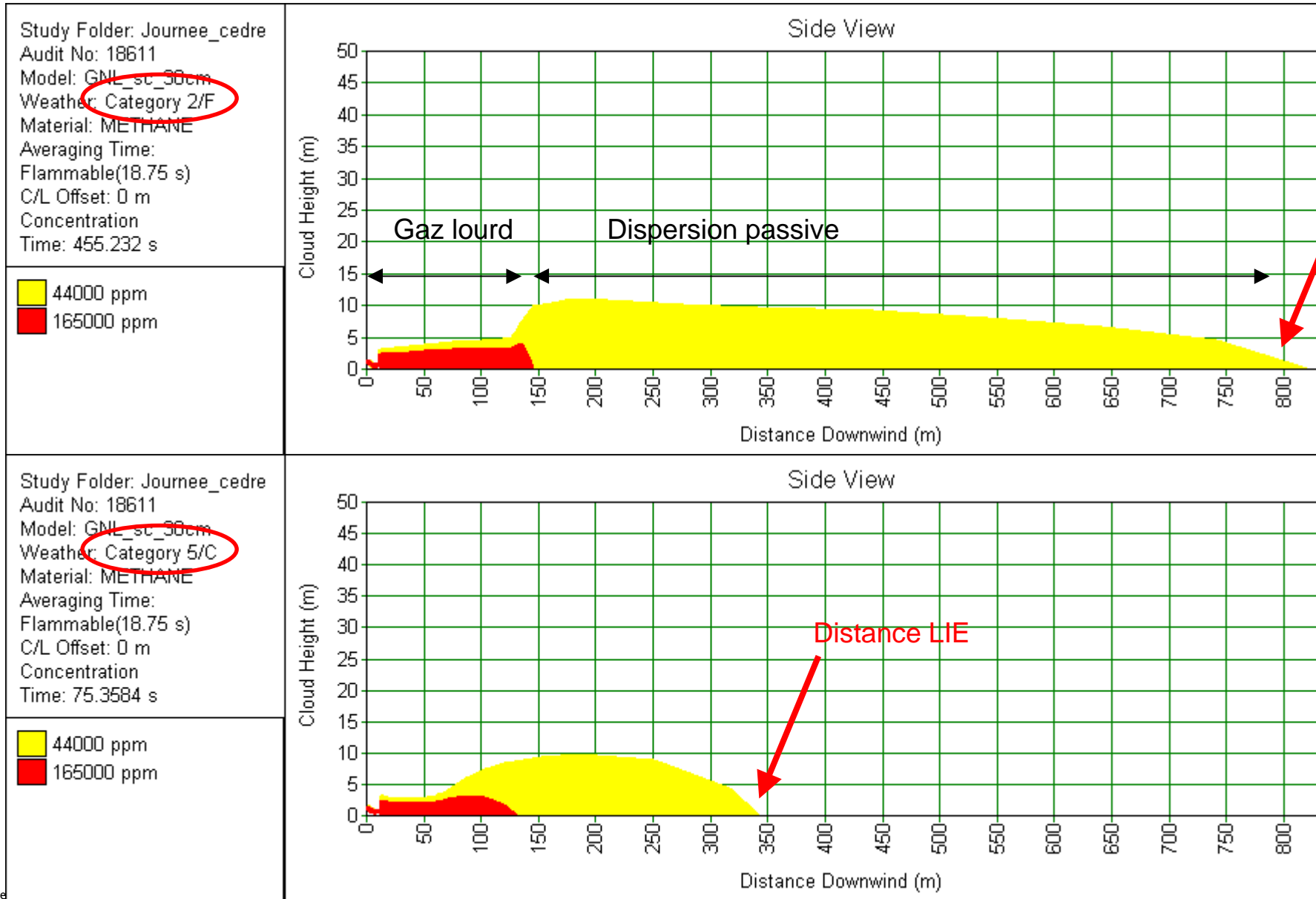
EFFECTS (TNO, Pays-Bas)

SAFER (Safer Systems, USA)

PHAST (DNV Software, UK)

SEVEX (Atm-Pro / Faculté Polytechnique de Mons, Belgique)...

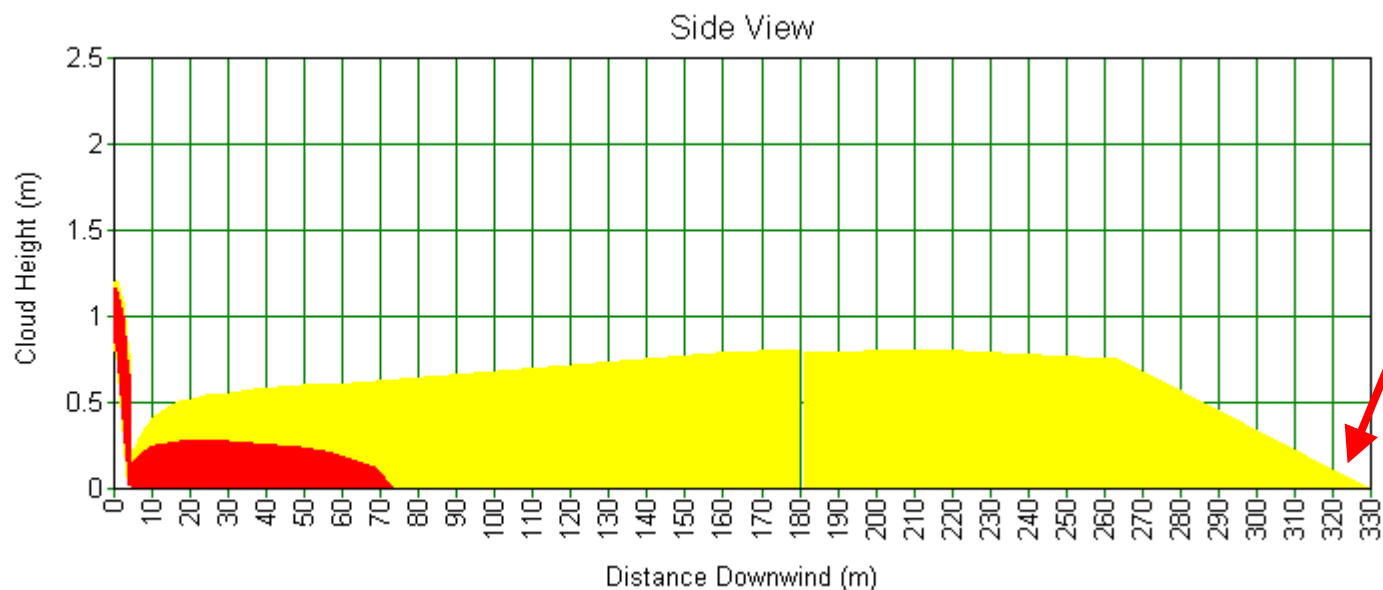
Exemple : simulation d'une dispersion de GNL (gaz dense) avec Phast



Exemple : simulation d'une dispersion de Xylène, avec Phast

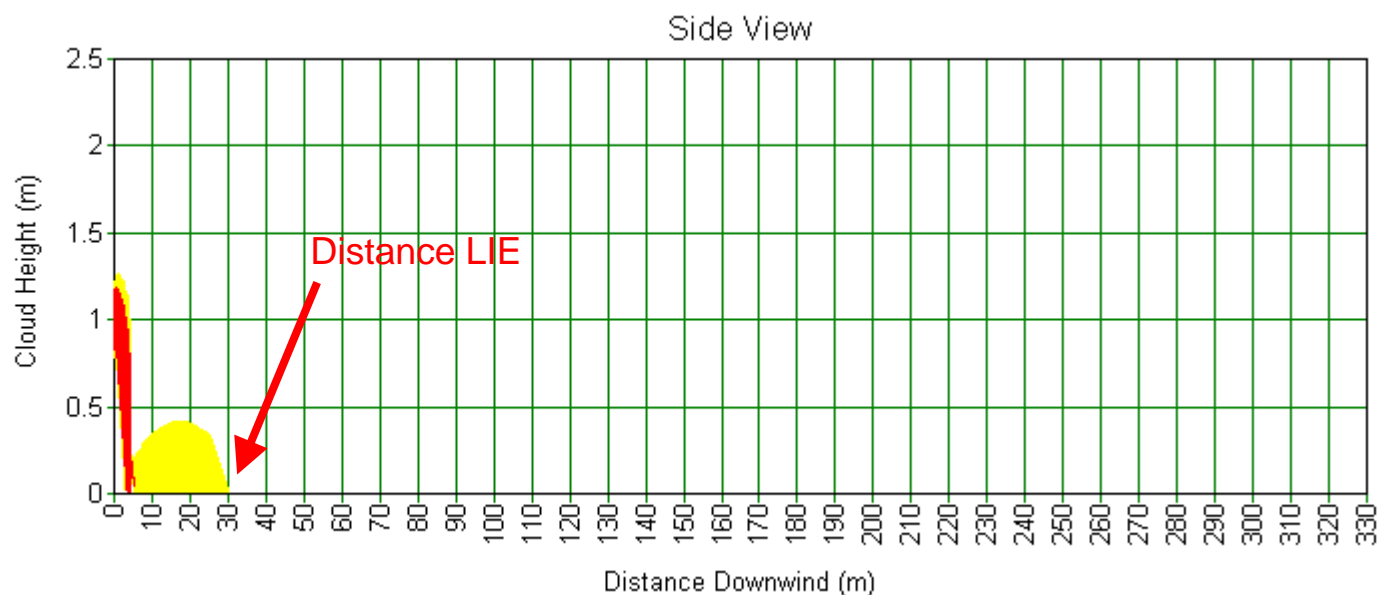
Study Folder: Journee_cedre
Audit No: 19521
Model: Xylene_sc10_2.5dm
Weather: **Category 2/F**
Material: M-XYLENE
Averaging Time:
Flammable(18.75 s)
C/L Offset: 0 m
Concentration
Time: 3574.87 s

11000 ppm
70000 ppm



Study Folder: Journee_cedre
Audit No: 19521
Model: Xylene_sc10_2.5dm
Weather: **Category 5/C**
Material: M-XYLENE
Averaging Time:
Flammable(18.75 s)
C/L Offset: 0 m
Concentration
Time: 3461.36 s

11000 ppm
70000 ppm



Modèles de type CFD

Principe

- Résolution des équations de la mécanique des fluides

Applications / Hypothèses

- Prise en compte des fluctuations turbulentes, des obstacles et du relief
⇒ Simulation d'environnements complexes
- Si les enjeux nécessitent d'affiner l'estimation (coûteux)

Limitations

- Nombreuses données d'entrée et paramètres numériques | → Coûteux
- Temps de calcul important
- Précision dépendant de la méthode de résolution, du maillage utilisé, du choix des modèles...

Exemples

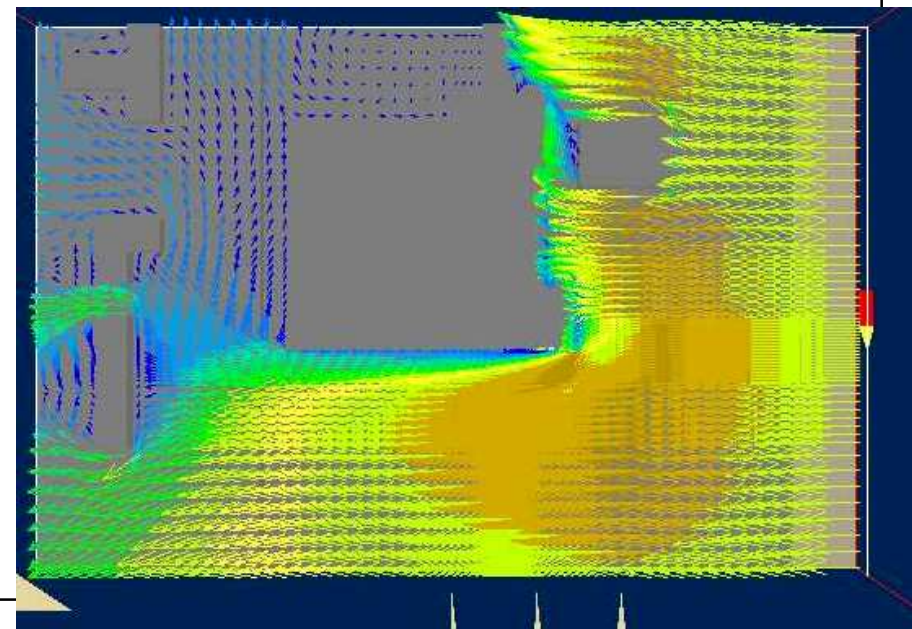
CFX, Fluent (Ansys) - *Généralistes*

PHOENICS (Cham) - *Généraliste*

Mercure (EdF) - *Dispersion atmosphérique*

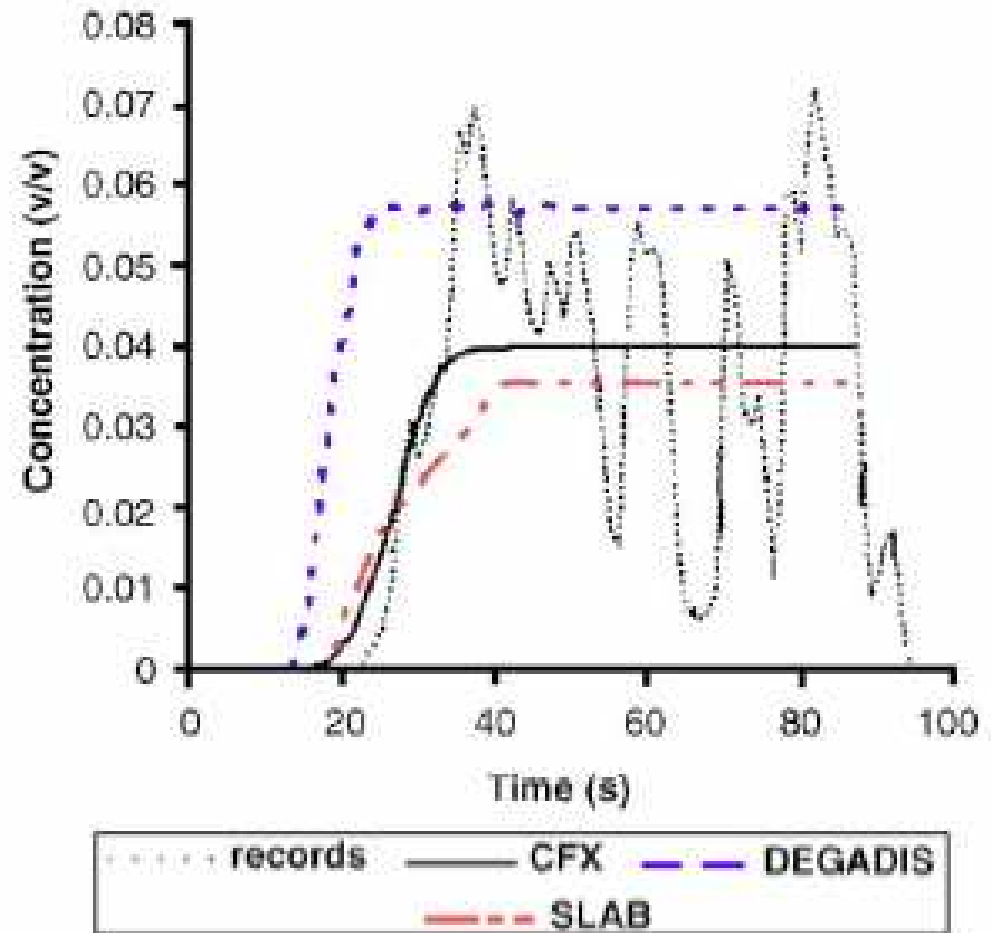
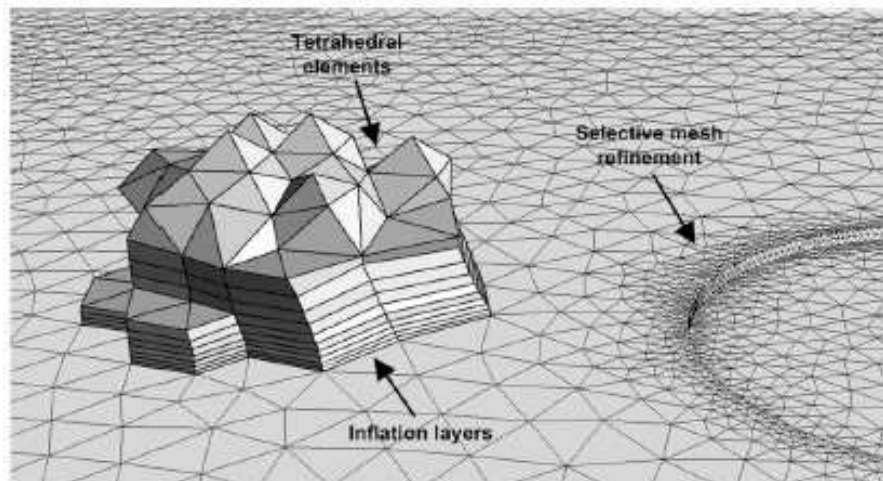
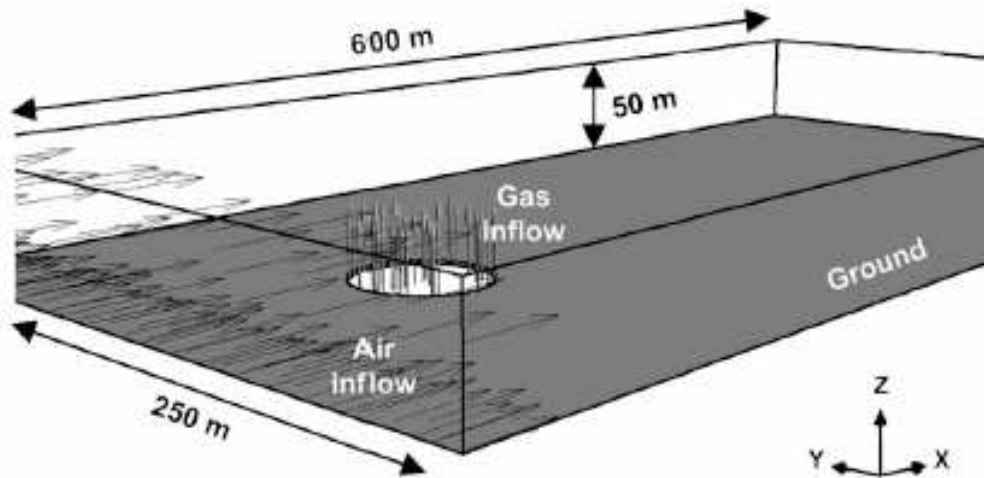
FLACS (GexCon) - *Dispersion et explosion*

...



Modèles CFD - Intégraux - Exemple de comparaison

Évaporation de flaque de Gaz Naturel Liquéfié et dispersion atmosphérique
(d'après Sklavounos & Rigas, 2006)



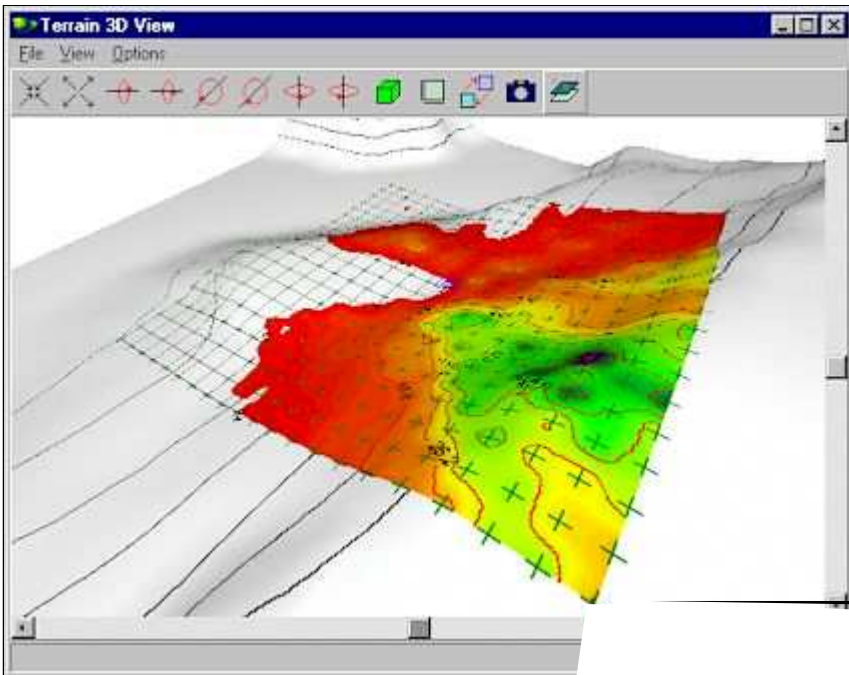
Vers la dispersion lointaine...

Modélisation de la dispersion aérienne en champ proche (qq m à qq km)

- Différents niveaux de complexité d'outils
- Domaines d'application (souvent) limités
- Importance de la caractérisation de la source de rejet
- Hypothèse de champ de vent uniforme dans l'espace et le temps

Modélisation de la dispersion aérienne en champ lointain (au-delà de qq km)

- Prise en compte de l'évolution spatio-temporelle des conditions météo
- Prise en compte du relief
- Approches eulériennes, lagrangiennes ou mixtes (+ lagrangien à bouffées gaussiennes...)
- Nombreux modèles, souvent dédiés à la simulation des émissions chroniques et de la qualité de l'air
⇒ Couplages possibles champ proche + champ lointain

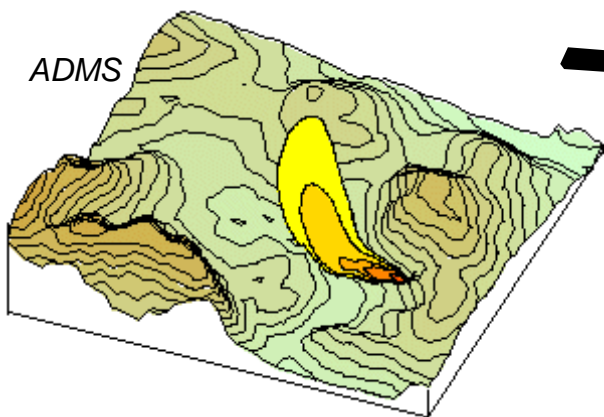


ISC-AERMOD View

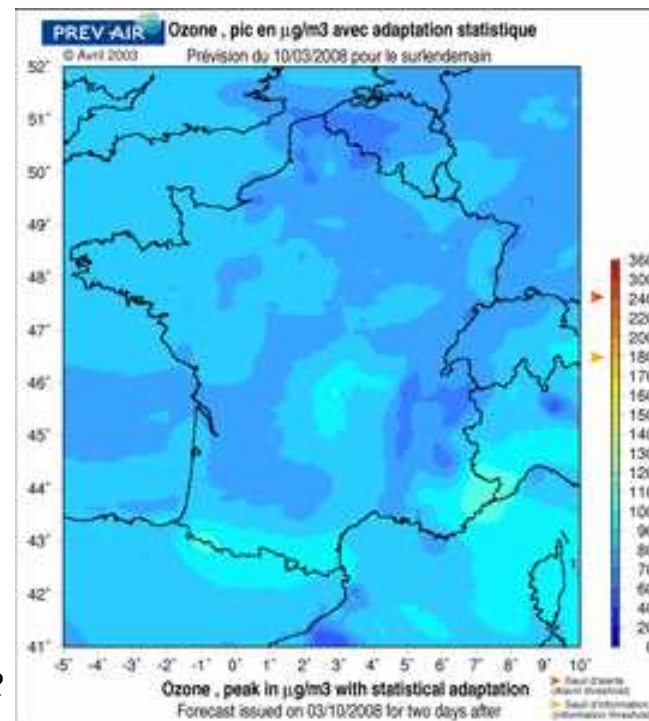
Breeze
CALPUFF



Merci de votre attention



ADMS



PREV 'AIR