



DISPERSION ATMOSPHERIQUE

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
CENTRE VAL DE LOIRE

Isabelle Sochet

Option Risques Accidents Industriels
Option Risques Environnementaux

Plan du cours

- ▶ Sources de pollution atmosphérique
- ▶ Contexte réglementaire
- ▶ Conditions de rejets
- ▶ Turbulence mécanique
- ▶ Turbulence thermique
- ▶ Classes de stabilité
- ▶ Modélisation : principes généraux
- ▶ Modèle Gaussien
- ▶ Modèle Intégral
- ▶ Modèle CFD

Sources de pollution atmosphérique



Principales sources de pollution atmosphérique (1/4)

- Emissions naturelles
- Emissions d'origine agricole
- Emissions industrielles
- Emissions domestiques
- Emissions dues aux transports
- Emissions dues aux traitements des déchets

Principales sources de pollution atmosphérique (2/4)

Emissions naturelles

- ▶ SO_2 , NO_2
- ▶ Eruptions volcaniques, décompositions organiques, feux de forêt, océans., transport de poussières en provenance des déserts ou érosion éolienne des sols
- ▶ Sources naturelles de pollution les végétaux, dont le cycle de vie produit de nombreux composés toxiques (H_2S , CH_4 , COV) ou allergisants tel que le pollen.
- ▶ Radon, gaz radioactif issu de la chaîne de désintégration radioactive de l'uranium présent dans certains sols et roches, représente également une forte source de pollution à l'intérieur des habitations

Principales sources de pollution atmosphérique (3/4)

Emissions d'origine agricole

- ▶ Ammoniac NH_3 , méthane CH_4 , protoxyde d'azote N_2O , monoxyde de carbone CO et pesticides
- ▶ Décomposition des matières organiques, aux animaux d'élevage et à l'utilisation massive d'engrais et de pesticides

Emissions industrielles

- ▶ Monoxyde de carbone CO et dioxyde de carbone CO_2 , dioxyde de soufre SO_2 , oxyde d'azote NO , poussières, composés organiques volatiles COV ...
- ▶ Secteurs avec rejets les plus importants :
 - ▶ production d'énergie (centrales thermiques),
 - ▶ les industries chimique, pétrolière et métallurgique,
 - ▶ les incinérateurs d'ordures ménagères.



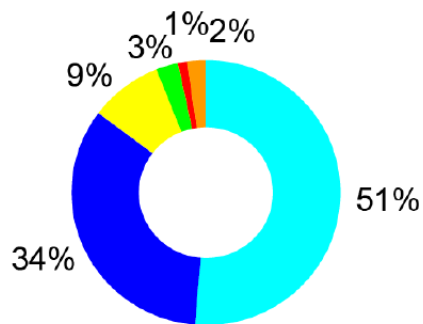
Principales sources de pollution atmosphérique (4/4)

Emissions domestiques

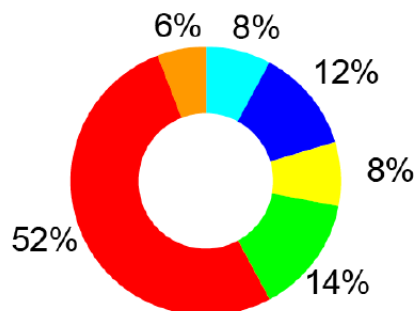
- ▶ Dioxyde de carbone CO_2 , monoxyde de carbone CO , dioxyde de soufre SO_2 , oxyde d'azote NO_x , poussières, métaux lourds ...

Emissions dues au traitement des déchets

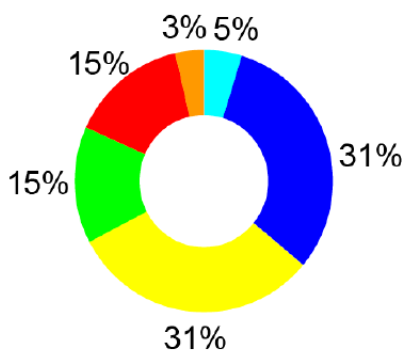
- ▶ Méthane CH_4 , acide chlorhydrique HCl , les métaux lourds, les dioxines et les furanes $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}$
- ▶ Incinération de déchets ménagers et industriels



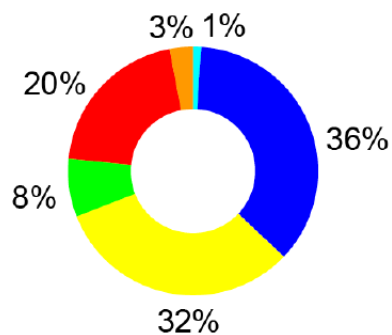
a) Pour le SO₂



b) Pour les NO_x



c) Pour les COV



d) Pour le CO

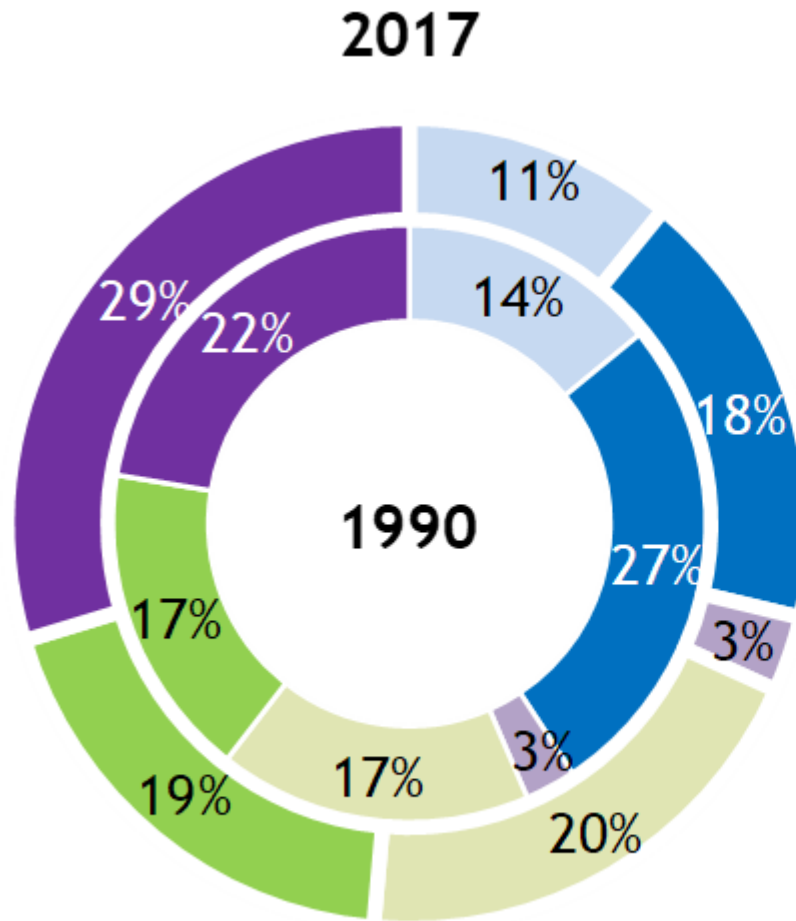
- Transformation d'énergie
- Agriculture/sylviculture
- Industrie manufacturière
- Transport routier
- Résidentiel/tertiaire
- Autres transports

<https://www.citepa.org/fr>

Pourcentage d'émissions des principaux polluants par secteur CITEPA, 2010

Répartition des émissions de GES par secteur émetteur

<https://www.citepa.org/fr>



Transformation énergie

Industrie manufacturière

Traitement centralisé des déchets

Résidentiel/tertiaire

Agriculture/sylviculture

Transports

Polluants réglementés (1/2)

12 polluants réglementés :












1. dioxyde de soufre (SO₂) ;
2. dioxyde d'azote (NO₂) ;
3. ozone (O₃) ;
4. particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) ;
5. monoxyde de carbone (CO) ;
6. benzène (C₆H₆) ;
7. plomb (Pb),
8. arsenic (As),
9. cadmium (Cd),
10. nickel (Ni),
11. hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
12. principalement le benzo[a]pyrène (B[a]P).



Polluants réglementés (2/2)

2018 : 5 polluants en dépassement

Schéma 1 : synthèse des dépassements des normes réglementaires de concentrations pour la protection de la santé à long terme

	Principales sources primaires d'émissions au niveau national	Respect de la réglementation en 2018	Nombre d'agglomérations en dépassement en 2018
SO ₂		✓	0
NO ₂		✗	11
O ₃		✗	40
PM ₁₀		✗	3
PM _{2,5}		✓	0
CO		✓	0
C ₆ H ₆		✗	1
As		✓	0
Cd		✓	0
Ni		✗	1
Pb		✓	0
B[a]P		✓	0

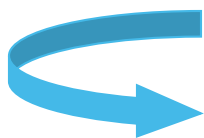
Notes : l'O₃ n'a pas de source d'émission directe dans l'atmosphère. C'est un polluant exclusivement secondaire qui se forme sous l'effet du rayonnement solaire et de réactions chimiques complexes entre différents polluants, appelés précurseurs. Parallèlement, une partie des PM₁₀ et des PM_{2,5} sont également des particules secondaires ; arsenic (As), cadmium (Cd), nickel (Ni), plomb (Pb), Benzo[a]pyrène (B[a]P).
Sources : Géod'Air, juillet 2019 ; Citepa, avril 2019, format Secten ; SDES

Contexte réglementaire



Contexte réglementaire

Arrêté du 29 septembre 2005



relatif à l'évaluation de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

Différents seuils d'effets toxiques



Effets létaux significatifs / Effets létaux



Effets irréversibles



Effets réversibles



SELS: Seuils d'effets létaux significatifs

Seuil de concentration au dessus duquel on peut observer une mortalité de 5% pour une durée d'exposition donnée.

SEL: Seuils d'effets létaux

Seuil de concentration au dessus duquel on peut observer une mortalité de 1% pour une durée d'exposition donnée.



SEI: Seuils d'effets irréversibles

Seuil de concentration au dessus duquel on peut observer des dangers significatifs pour la vie humaine pour une durée d'exposition fixée.

SER: Seuils d'effets réversibles

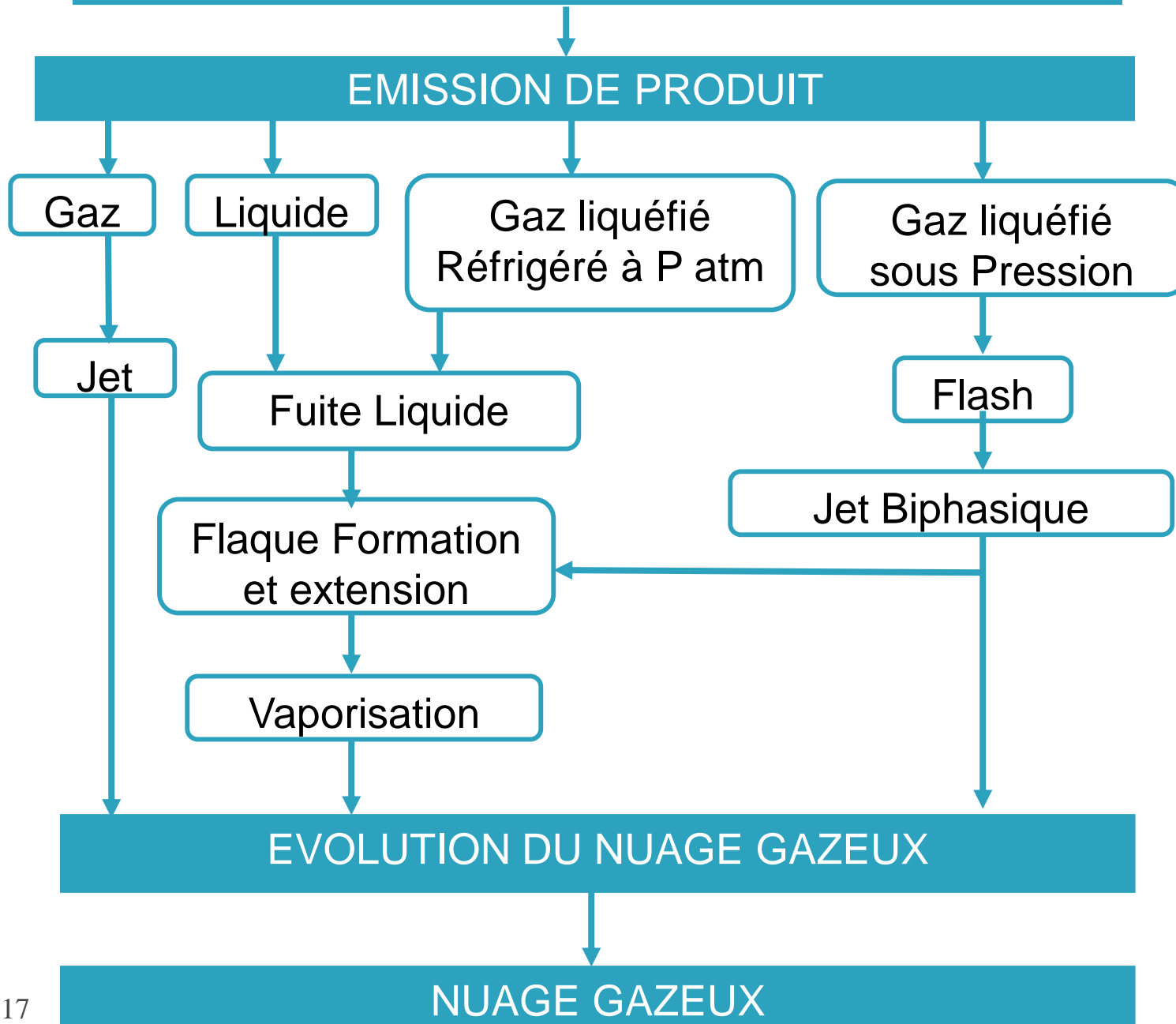
Seuil de concentration à partir duquel les premiers effets sont constatés sur une population pour une durée d'exposition fixée.



Conditions de rejets



CONDITIONS DE L'ACCIDENT OU DE LA RUPTURE



Conditions de l'accident ou de la rupture

- Rupture ou défaillance d'un joint, défaillance d'une garniture
- Blocage en position ouverte d'un robinet de purge ou d'évent
- Eclatement d'un disque de rupture
- Ouverture d'une soupape
- Rupture par agression physique (projectile, engin ...)
- Rupture par pertes de propriétés mécaniques (corrosion, fatigue, fragilisation par effet thermique ...)
- Rupture en raison de propriétés mécaniques insuffisantes (défaut de soudure, métal non conforme ..)



Emission du produit

Perte de confinement continue

Emission de produit avec un débit \pm variable pendant le temps nécessaire à la détection et à la mise en œuvre des moyens d'intervention susceptibles de réduire ou annuler le débit

➡ durée variable = f (moyens prévention ; accessibilité)

Exemples : Fuite sur une paroi de réservoir; Rupture totale d'une canalisation courte; Fuite à partir d'une canalisation longue

Perte de confinement instantanée

Libération très rapide d'une quantité importante ou de la totalité du produit contenu

Exemple : éclatement du réservoir



Dispersion atmosphérique

Dispersion atmosphérique

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

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



Echelles de dispersion atmosphérique

Micro
< 1 km
Sec - min

Locale
100 m – 50 km
Min - heures

Méso (régionale)
~10 – 200 km
jours

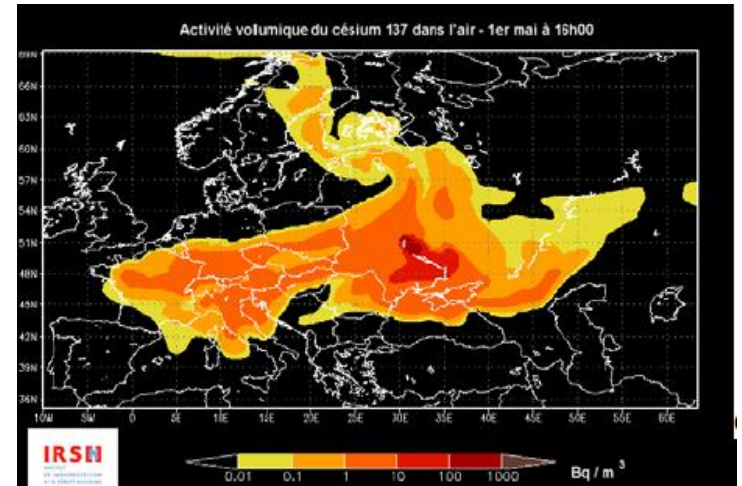
Macro, Globale
(synoptique)
~100 – 100 000 km
Mois - années



Essais INERIS



Buncefield



Dispersion toxique et inflammable



Evolution du nuage gazeux

Propriétés physiques

- ▶ Densité du nuage / air : conditions T, P normales
- ▶ T émission (alourdissement froid / allègement chaud)
- ▶ Formation aérosols (ammoniac) ; brouillard = f (humidité air, T)

Propriétés chimiques

- ▶ Réaction possible

Conditions initiales de la dispersion : terme source

- ▶ Masse ou débit massique
- ▶ Dimension de la source
- ▶ Hauteur de la source / au sol
- ▶ Température

Conditions atmosphériques

- ▶ Météorologie peut être influencée par : géométrie du site, phénomènes locaux (ascendance près d'un four), incendie ...

Types de gaz

Gaz neutres ou passifs

- ▶ Gaz de même densité que l'air ou très dilué
- ▶ Fluide uniquement soumis à l'action du fluide porteur, l'air
- ▶ Pas de modifications significatives des caractéristiques de l'air

Gaz denses ou lourds (effets de gravité prédominants)

- ▶ Gaz plus dense que l'air : Dichlore (Cl_2), Phosgène (COCl_2)....
- ▶ Gaz froid : Hydrogène cryogénique...
- ▶ Gaz issu d'un rejet diphasique : Flash d'un rejet d'ammoniac liquide sous pression

Gaz légers

- ▶ Gaz moins dense que l'air : Hydrogène (H_2), Méthane (CH_4)...
- ▶ Gaz chaud : fumées d'incendie, ...

Types de turbulence

Turbulences d'origine mécanique

- ▶ Liées aux rugosités du sol
- ▶ Variations spatiales de vitesse (cisaillement du vent)
 - ▶ Dynamique : turbulence dans les couches atmosphériques thermiquement stables

Turbulences d'origine thermique:

- ▶ Provoquée par le flux turbulent de chaleur
- ▶ Caractéristique importante de la stabilité atmosphérique
 - ▶ liées au gradient vertical de densité de l'air, lui-même lié au gradient vertical de la température (flottabilité : stabilité convective)

Turbulence mécanique



Obstacles et Relief

Obstacle passif : mur, bâtiment, rideau d'arbres

- ▶ accumulation en amont
- ▶ effets de retardement et diminution de la concentration dans l'aval proche

Obstacle actif : rideau d'eau ou de vapeur

- ▶ accumulation en amont
- ▶ dilution par augmentation du mélange avec l'air ambiant,
- ▶ dissolution ou réaction chimique
- ▶ effet thermique

Relief

- ▶ accélération du nuage sur une pente descendante
- ▶ ralentissement du nuage sur une pente ascendante

Obstacles multiples : site industriel

- ▶ augmentation dans certaines directions des concentrations par un effet de canalisation entre les bâtiments.



Rugosité : valeurs typiques

Terrain Description Terrain	Rugosité de la surface (m)
Neige, aucune végétation	0.005
Piste, terrain plat ouvert, herbe, et quelques obstacles isolés (aéroport)	0.030
Basses récoltes et grands obstacles occasionnels	0.1000
Hautes récoltes et obstacles dispersés, zone d'habitat dispersé	0.300
Park land, buissons, et nombreux obstacles	0.500
Obstacles réguliers (banlieue, forêt, site industriel sans obstacles importants)	1.000
Zone urbaine : ville, sites industriel avec bâtiments importants	3.000



Notions de météorologie

Facteurs météorologiques pilotant la dispersion des polluants :

- ▶ Vitesse et direction du vent
- ▶ Turbulence atmosphérique



Direction du vent

- ▶ Influence sur la zone affectée
- ▶ Varie en fonction du parcours !!
- ▶ Champs du vent
- ▶ Varie avec l'altitude
- ▶ Variations avec le temps/position: stimulent la dispersion



Vitesse et direction du vent

Etude météorologique du site

- ▶ peut se baser sur un tableau de fréquences de mêmes couples (vitesse, direction) (Tableau de contingence)

Obtention des données \Rightarrow station météorologique

- ▶ site \neq lieu de la station météorologique
- ▶ présence de vallées ou de falaises \Rightarrow modifications notables (vents faibles)

Tableau de contingence doit préciser :

- ▶ Lieu de la mesure
- ▶ Hauteur de la mesure /sol
- ▶ Nombre de mesures : il est conseillé : au moins 1 relevé sur 10 mn toutes les 3 heures pendant 1 an (3 ou 10 ans)

Vitesse du vent varie en fonction de l'altitude :

- ▶ Météorologie Nationale : mesures effectuées à 10 m du sol
- ▶ \Rightarrow correction de la vitesse du vent à la hauteur de la source (*cheminée*)

Correction de la vitesse du vent

Loi en puissance (Turner, 1994)

$$u = u_{\text{ref}} \ln \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^n$$

u : vitesse du vent à l'altitude z

u_{ref} : vitesse du vent à l'altitude z_{ref}

n : coefficient dépendant de la stabilité atmosphérique

Loi indépendante de la rugosité du sol.

Etablie pour des émissions en altitude (cheminée), donc non applicable aux faibles altitudes

Correction de la vitesse du vent

Loi en puissance (Turner, 1994)

$$u = u_{\text{ref}} \ln \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^n$$

u : vitesse du vent à l'altitude z

u_{ref} : vitesse du vent à l'altitude z_{ref} (10m)

n : coefficient dépendant de la stabilité atmosphérique

Classe de stabilité atmosphérique	n zone urbaine	n zone rurale
A	0.15	0.07
B	0.15	0.07
C	0.20	0.10
D	0.25	0.15
E	0.40	0.35
F	0.60	0.55



Correction de la vitesse du vent

Loi exponentielle – rugosité du sol

$$U = \frac{U^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

U : vitesse du vent à l'altitude z

U^* : vitesse de friction (connaissance de v_{vent} à z donnée)

k : constante de Von Karman $k = 0.41$

z_0 : rugosité du sol



Turbulence thermique



Turbulence thermique

- La stabilité atmosphérique influence la dispersion du panache :
 - ▶ des conditions stables dispersent peu le panache
 - ▶ des conditions instables dispersent fortement le panache



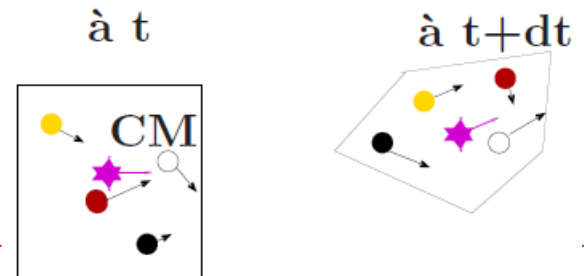
Composition de l'air

Nom	Formule	Masse molaire (g mol ⁻¹)	Proportion / masse d'air sec
Diazote	N ₂	28.016	78,08 %
Dioxygène	O ₂	32	20,95 %
Argon	Ar	39,944	0,934 %
Dioxyde de carbone	CO ₂	44,1	380 ppm
Néon	Ne		18,18 ppm
Hélium	He		5,24 ppm
Azote	NO ou NO ₂		5 ppm
Méthane	CH ₄		1,7 ppm
Dihydrogène	H ₂		0,5 ppm
Ozone	O ₃		0 à 0,01 ppm
...

- ▶ En moyenne, l'air est sec
- ▶ M_{air} ~ 28,9 g.mol⁻¹
- ▶ Gaz parfait

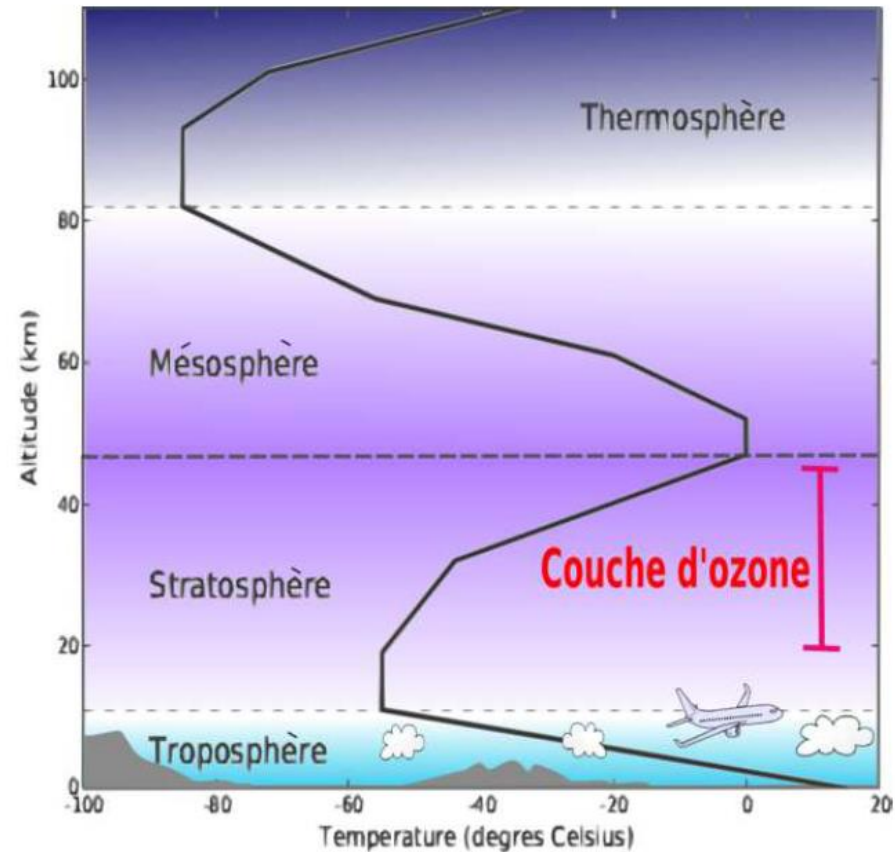
Parcelle d'air

- ▶ Ensemble de molécules d'air suffisamment nombreuses pour que les variations des paramètres moyens soient continues.
- ▶ Sa taille dépend de l'échelle des phénomènes considérés.
- ▶ L'état de la particule n'est connu qu'à travers ses paramètres moyens donc jamais de manière exacte.
- ▶ Déplacement de la particule d'air =
déplacement du centre de masse
+ évolution du volume



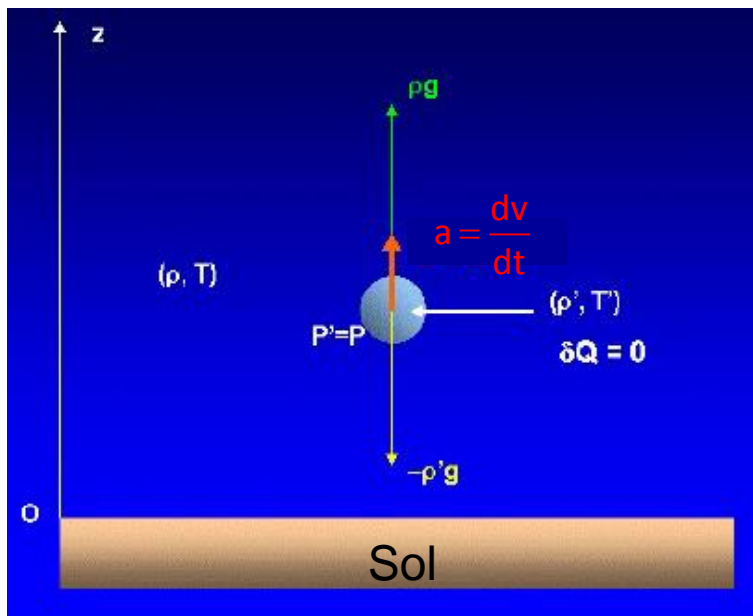
Atmosphère standard de référence

- ▶ $T_0 = 288.15 \text{ K} = 15 \text{ °C}$
- ▶ $P_0 = 1013.25 \text{ hPa} = 1 \text{ atm}$
- ▶ $\rho_0 = 1.225 \text{ kg.m}^{-3}$
- ▶ Dans la troposphère :
 $T = T_0 + \beta z$ avec
$$\beta = \frac{dT}{dz} = -6.5 \text{ K.km}^{-1}$$
- ▶ $c_p = 1004,5 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$



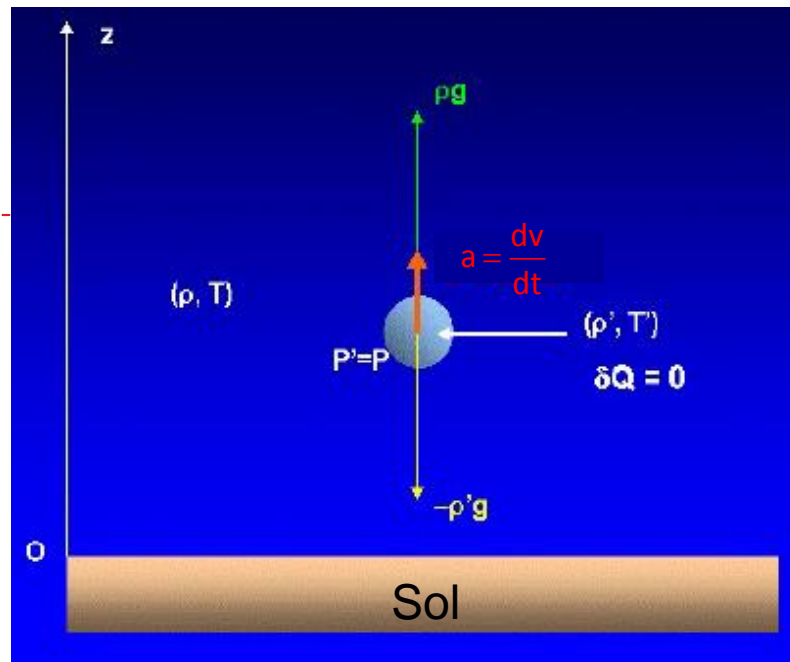
Flottabilité

- Composition de l'air en moyenne est uniforme dans les premiers 100 km de l'atmosphère
- Concept de la parcelle d'air sec



- Ensemble homogène de particules d'air : ρ' , T'
- Déplacement **adiabatique** sur Oz
- T' différent de T atmosphère ambiante $\forall z$
- $P' = P$ à l'interface de la parcelle
- Atmosphère ambiante au repos : équilibre hydrostatique





Mouvement de la parcelle : $\rho' a = \rho' \frac{dv}{dt} = -\rho' g - \frac{\partial P}{\partial z}$ **Equation du mouvement**

Air ambiant à l'équilibre (i.e. équilibre hydrostatique de l'atmosphère) :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

$$\rho' \frac{dv}{dt} = -\rho' g + \rho g$$

$$\Rightarrow \frac{dv}{dt} = g \frac{\rho - \rho'}{\rho'} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = g \frac{\rho - \rho'}{\rho'} \quad (1)$$

$$\longrightarrow f = (\rho - \rho')g$$

Flottabilité = écart entre la poussée d'Archimède et le poids de la parcelle d'air par unité de volume

Si $\rho' < \rho \longrightarrow f > 0$ la parcelle monte

Si $\rho' > \rho \longrightarrow f < 0$ la parcelle descend

Air : gaz parfait, à pression égale entre l'air et la parcelle ($P = P'$)

$$\frac{P}{\rho T} = \frac{P'}{\rho' T'} \longrightarrow \frac{\rho - \rho'}{\rho'} = \frac{T' - T}{T} \longrightarrow \frac{dv}{dt} = g \frac{T' - T}{T} \quad (2)$$

Si $T' > T$ ($T' < T$) \longrightarrow la parcelle monte (descend)

Expression de $\frac{dv}{dt} = g \frac{T' - T}{T}$ en fonction des gradients de température

$z_0 + \delta z : T' \neq T$



Parcelle : $T'(z_0 + \delta z) \approx T(z_0) + \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)_{\text{adiabatique}} \delta z$

Air : $T(z_0 + \delta z) \approx T(z_0) + \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right) \delta z$ (3)

$z_0 : T' = T$

$$\frac{dv}{dt} = g \frac{T' - T}{T} \quad (2) \quad \longrightarrow \quad \frac{dv}{dt} = \frac{1}{T(z_0)} \left[\left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)_{\text{adiabatique}} - \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right) \right] g \delta z \quad (4)$$



$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{T(z_0)} \left[\left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)_{\text{adiabatique}} - \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right) \right] g \delta z \quad (4)$$

Atmosphère	Gradient de température	Variation de z	Commentaire
Stable	$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} < \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$	$\delta z > 0$	Accélération $\frac{dv}{dt} < 0$ Air ralentit en montant
		$\delta z < 0$	Accélération $\frac{dv}{dt} > 0$ Air accélère en descendant
Instable	$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} > \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$	$\delta z > 0$	Accélération $\frac{dv}{dt} > 0$ Air accélère en montant
		$\delta z < 0$	Accélération $\frac{dv}{dt} < 0$ Air ralentit en descendant
Neutre	$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} = \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$	$\delta z > 0$ $\delta z < 0$	Accélération nulle L'air monte ou descend à vitesse constante ou est immobile

Température potentielle

- Bilan d'énergie d'une **parcelle d'air sèche** de masse unité

$$\delta Q = dU + PdV \quad (5)$$

- ▶ Gaz parfait : $dU = c_v dT$ avec $c_p - c_v = r$ soit $c_v = c_p - \frac{R}{Mw}$

$$\longrightarrow dU = c_p dT - \frac{R}{Mw} dT \quad (6)$$

- ▶ Variation de volume d'une unité de masse de la parcelle :

$$dV = d\left(\frac{1}{\rho}\right) = -\frac{d\rho}{\rho^2}$$

- ▶ Gaz parfait - équation d'état par unité de masse : $PV = \frac{R}{Mw} T$

$$\longrightarrow d(PV) = d\left(\frac{R}{Mw} T\right) \longrightarrow PdV = -VdP + \frac{R}{Mw} dT$$

$$\longrightarrow PdV = -\frac{1}{\rho} dP + \frac{R}{Mw} dT \quad (7)$$

$$\delta Q = dU + PdV \quad (5)$$

$$dU = c_p dT - \frac{R}{Mw} dT \quad (6)$$

$$PdV = -\frac{1}{\rho} dP + \frac{R}{Mw} dT \quad (7)$$

$$\delta Q = c_p dT - \frac{1}{\rho} dP \quad (8)$$

► Déplacement adiabatique de la parcelle d'air

$$\longrightarrow \delta Q = 0 \quad \longrightarrow c_p dT = \frac{1}{\rho} dP \quad \text{avec} \quad \longrightarrow \frac{dT}{T} = \frac{R}{Mw c_p} \frac{dP}{P}$$

$$\ln \left(TP^{\frac{R}{Mw c_p}} \right) = \text{cste} \quad \text{soit} \quad d \left(\ln \left(TP^{\frac{R}{Mw c_p}} \right) \right) = 0 \quad (9)$$

- Température potentielle θ

La température potentielle est la température de l'air (initialement à T, P) une fois ramenée de façon adiabatique au niveau de pression de référence P_0 .

En désignant par P_0 la pression atmosphérique au sol, par :

$$d \left(\ln \left(T P^{-\frac{R}{Mw c_p}} \right) \right) = 0 \quad (9)$$

On obtient :

$$\theta P_0^{-\frac{R}{Mw c_p}} = T P^{-\frac{R}{Mw c_p}} \quad (10)$$

Soit encore :

$$\theta = T \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-\frac{R}{Mw c_p}} \quad \text{avec } c_{P_{\text{air}}} = 1005 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

Il y a donc invariance de la température potentielle θ

$$\theta P_0^{-\frac{R}{Mw c_p}} = T P^{-\frac{R}{Mw c_p}} \quad (10)$$

Le gradient de θ s'écrit à partir de (10) :

$$\frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{R}{Mw c_p} \frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (11)$$

L'invariance de la température potentielle θ lors du déplacement adiabatique d'une parcelle d'air signifie que :

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad \longrightarrow \quad \text{Par (11)} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} = \frac{R}{Mw c_p} \frac{T}{P} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (12)$$

Gradient de température potentielle θ en condition quelconque :

$$\longrightarrow \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} - \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} \right) \quad (13)$$

Mesure écart de l'atmosphère par rapport à une transformation adiabatique

- Nouvelle formulation des conditions de stabilité

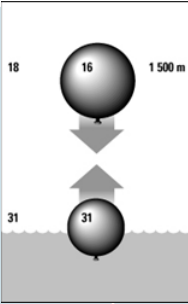
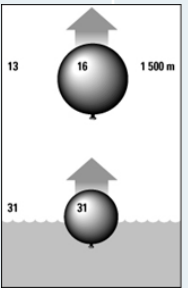
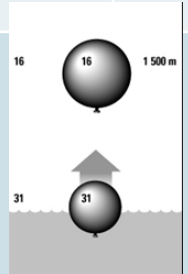
$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} - \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} \right) \quad (13)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{T(z_0)} \left[\left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)_{\text{adiabatique}} - \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right) \right] g \delta z \quad (4)$$

➡ La flottabilité de la parcelle d'air s'exprime en fonction du gradient de température potentielle (par (4) et (13)) :

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} g \delta z \quad (14)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\delta T}{\delta z} \right)_{\text{adiabatique}} - \left(\frac{\delta T}{\delta z} \right) \right] g \delta z = -\frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} g \delta z \quad (14)$$

Atmosphère	Gradient de température potentielle	Gradient de température	Commentaire
Stable	 $\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$	$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} < \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$	La force de flottabilité sur la parcelle d'air est une force de rappel qui tend à ramener la parcelle d'air à sa position d'équilibre
Instable	 $\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$	$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} > \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$	La force de flottabilité sur la parcelle d'air est une force de même signe que le déplacement, donc la parcelle d'air s'éloigne de sa position d'équilibre
Neutre	 $\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$	$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}}$	La force de flottabilité sur la parcelle d'air est nulle donc la parcelle d'air reste sur la nouvelle position d'équilibre


Gradient adiabatique de l'air sec

Air ambiant à l'équilibre : $\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$

avec $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{adiab}} = \frac{R}{Mw c_p} \frac{T}{P} \frac{\partial P}{\partial z}$ (12)

et $\frac{P}{\rho} = \frac{R}{Mw} T$

- Gradient adiabatique de l'air sec :

 $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{adiab}} = -\frac{g}{c_p} < 0$ (15)

Gradient adiabatique de l'air sec

- Gradient adiabatique de l'air sec :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{adiab}} = -\frac{g}{c_p} < 0 \quad (15)$$

Gradient négatif : une diminution adiabatique de la température avec l'altitude, qui vaut :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{adiab}} = -\frac{9.81 \frac{[\text{m.s}^{-2}]}{1005 \frac{[\text{J.K.kg}^{-1}]}}{}}{=} = -0.00976 \text{ K.m}^{-1} \quad \longrightarrow \quad \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{adiab}} \propto -9.8 \text{ K.km}^{-1}$$

Les observations indiquent un gradient moyen de température

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{adiab}} \propto -7 \text{ K.km}^{-1}$$

$\longrightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) > \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{adiab}} \longrightarrow \text{Atmosphère stable (air sec)}$

Inversion de température

Il y a une inversion de température lorsque de l'air chaud se trouve au-dessus d'une couche d'air plus froid donc plus lourd.

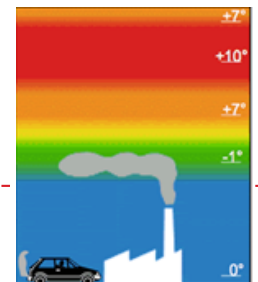
➡ Dans ce cas, la masse d'air qui se trouve près du sol ne peut s'élever et se disperser dans l'atmosphère.



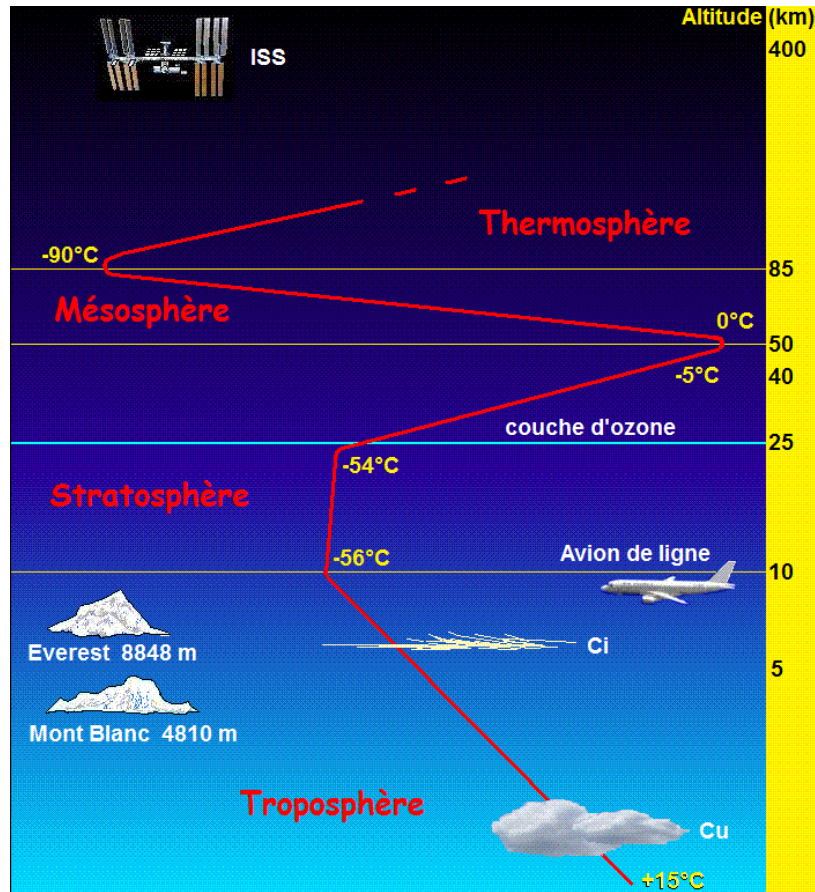
Air situé dans la couche d'inversion, près du sol, est piégé : aucun mouvement turbulent ou de convection ne peut vaincre la résistance de l'atmosphère située au-dessus de cette couche.



Absence de brassage vertical : les substances polluantes sont piégées et s'accumulent



Inversion de température

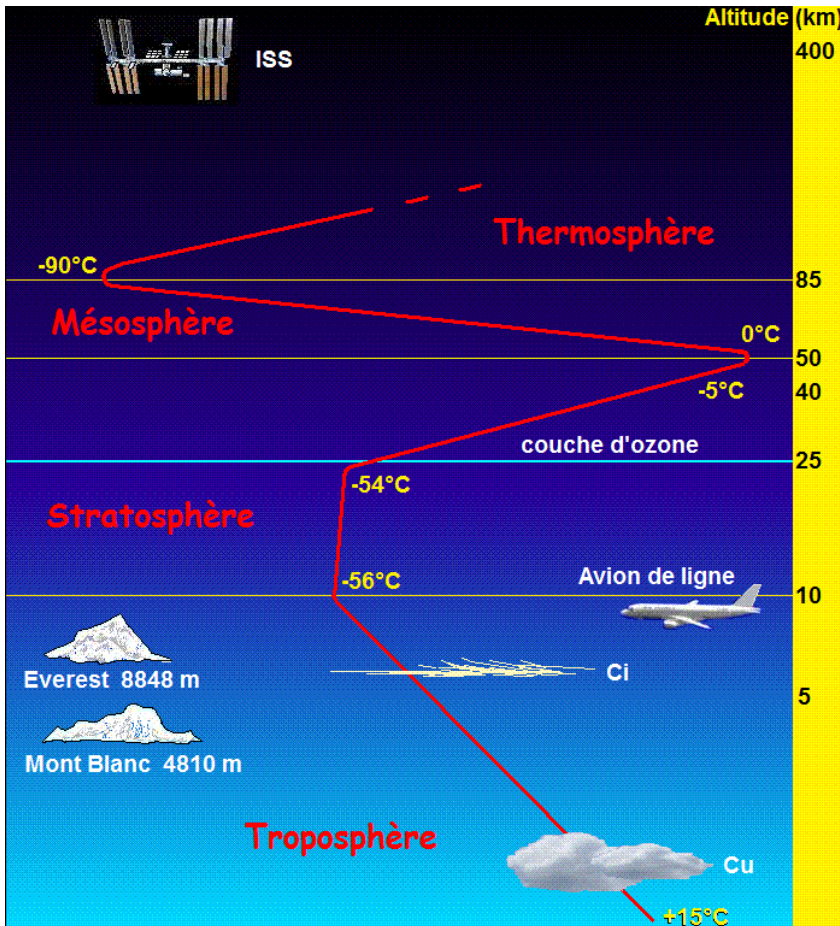


■ Quand ?

➡ Refroidissement rapide par perte de rayonnement infrarouge pendant une nuit claire et calme.

➡ Couche d'air chaud provenant du sud transportée au-dessus d'une couche d'air plus froid des latitudes moyennes

Inversion de température



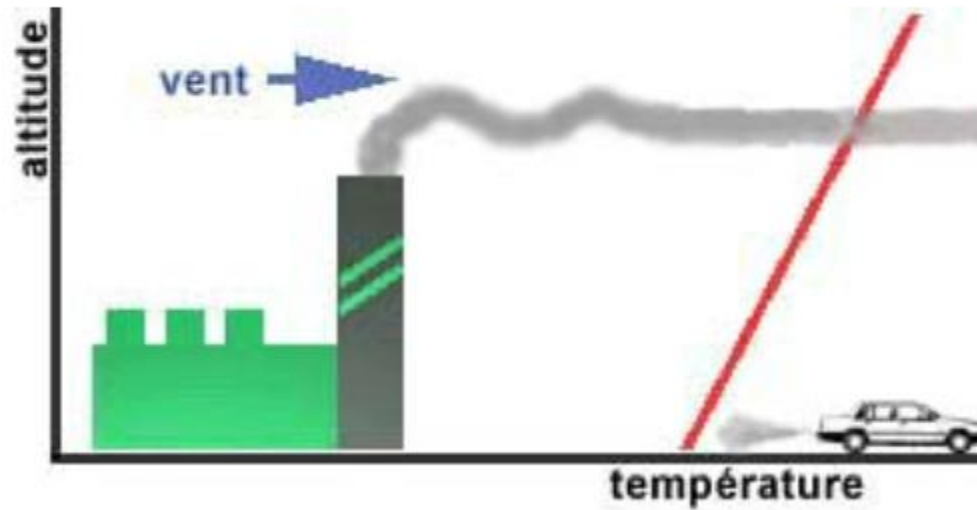
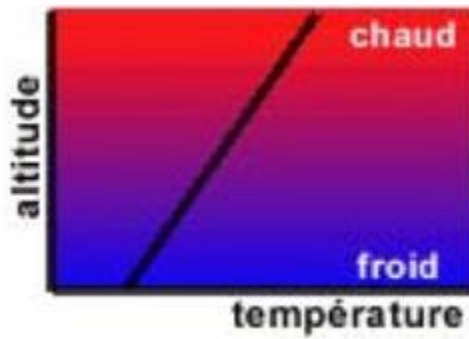
► Il existe 2 cas d'inversion de T :

- 1er cas : T augmente avec z
L'air près du sol est plus froid que l'air plus haut. Dans ces conditions, l'air est stable et le mouvement vertical de l'air ne peut s'effectuer.
- 2eme cas : T diminue avec z près du sol mais augmente avec z plus haut



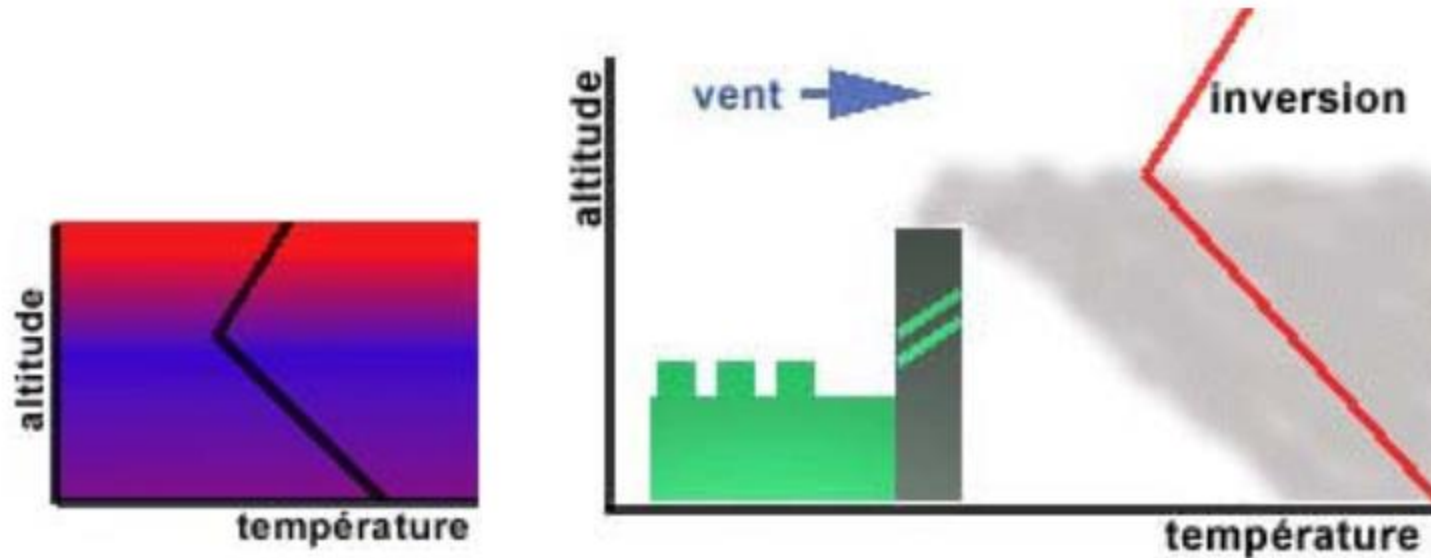
Inversion de température - conséquences

- ▶ 1er cas : T augmente avec l'altitude



Inversion de température - conséquences

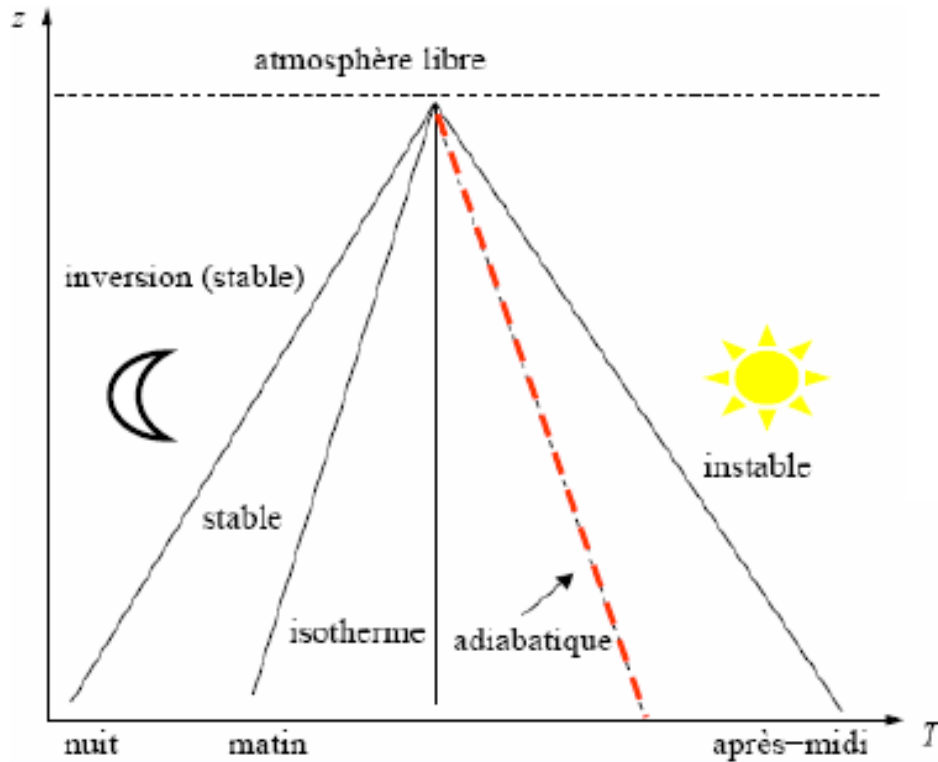
- ▶ 2ème cas : T diminue avec z près du sol mais augmente avec z plus haut



Le comportement de la traînée de fumée dépend de la hauteur à laquelle se produit l'inversion.

Evolution de la stabilité atmosphérique au cours de la journée

Gradient de T = écart à une situation adiabatique



- Atmosphère stable (matin)

$$\frac{\partial T}{\partial z} \succ \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{ad}$$

- Atmosphère neutre

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{ad}$$

- Atmosphère instable (après-midi)

$$\frac{\partial T}{\partial z} \prec \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{ad}$$




La T au sol augmente en cours de journée puis diminue au cours de la nuit.

Air humide

- Atmosphère stable en convection sèche
- Atmosphère humide
 - ▶ la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, aux altitudes qui correspondent au point de rosée, libère la chaleur latente de condensation qui induit des conditions d'instabilité atmosphérique, permettant alors le brassage thermique selon la verticale dans l'atmosphère.



Instabilité convective de l'air humide

- Une parcelle d'air humide s'élevant dans l'atmosphère contient une humidité spécifique (H)
 - ▶ Humidité spécifique : rapport de la masse volumique de vapeur d'eau contenue dans la parcelle d'air humide et de la masse volumique de cette parcelle d'air
- Il y a condensation lorsque cette humidité spécifique devient égale à l'humidité spécifique saturante (H_{sat}) qui dépend surtout de la température et très peu de la pression.
 - ▶ Humidité spécifique saturante : l'humidité spécifique maximale atteinte avant la condensation.
- $T(z)$  $H_{\text{sat}}(z)$ 
à z donnée, appelée niveau de condensation, on obtient $H = H_{\text{sat}}$
la vapeur d'eau condense en minuscules gouttelettes d'eau liquide
 formation d'un nuage.

-
- La condensation de l'eau est exothermique $\delta Q > 0$:

$$\delta Q = - m_a L_v df_{m,v}$$

m_a : masse d'air

L_v : chaleur latente de vaporisation de la vapeur d'eau
($2.5 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ à 273 K)

$f_{m,v}$: fraction massique de vapeur d'eau : condensation $f_{m,v} < 0$

- Ce dégagement de chaleur entraîne une diminution de la masse volumique de la parcelle d'air, augmentant alors sa flottabilité.
- L'ascension de la parcelle d'air est donc accélérée : le mouvement convectif vertical est instable.



-
- L'intensité de la convection de l'air humide dépend donc :
 - ▶ du profil de température dans la troposphère
 - ▶ de l'humidité atmosphérique
 - ▶ de la température à la surface du sol
 - Une atmosphère sèche est donc plus stable qu'une atmosphère humide

Mesures de la turbulence

- Mesure de la turbulence donnée par l'écart-type σ_{xyz} des fluctuations du vent sur un intervalle de temps (1 heure)
- σ_{xyz} dépend de
 - ▶ La distance horizontale entre le point de rejet et le point d'intérêt
 - ▶ Des conditions de stabilité atmosphérique
 - ▶ De la vitesse du vent
 - ▶ De la rugosité de la surface
 - ▶ De la hauteur de la source



-
- Turbulence homogène dans l'espace et stationnaire dans le temps avec un champ de vent moyen uniforme
 - Diffusivité turbulente dans la direction du vent \ll convection (vents forts)

Coefficient de diffusion

Diffusivité turbulente

$$\sigma_x = \frac{2K_x(x-x_0)}{\bar{u}}$$

-
- $\sigma = A x^n$ avec A, n : valeurs expérimentales
 - Stabilité atmosphérique augmente alors σ diminue
 - ▶ Nuit nuageuse avec vitesse vent faible : la stabilité atmosphérique est très élevée et écart-type sont petits
 - ▶ Temps nuageux l'après-midi d'été avec des vitesses de vents faibles, alors la stabilité est faible: condition instable et écart-type important
 - Les stabilités ou instabilités extrêmes se produisent uniquement pour vents faibles.
 - Pour des vitesses de vent élevées, la stabilité est toujours neutre avec des valeurs intermédiaires de σ



Ensoleillement

Couverture ciel	Élévation du soleil (angle A en degrés)		
	$A > 60^\circ$	$60^\circ \leq A < 35^\circ$	$35^\circ \leq A < 15^\circ$
4/8 ou moins ou nuages élevés minces	Fort	Modéré	Faible
5/8 à 7/8 nuages 2 km – 6 km	Modéré	Faible	Faible
5/8 à 7/8 nuages bas < 2 km	Faible	Faible	Faible

Taux d'ensoleillement
Procédure EPA (US Environmental Protection Agency)



Classes de stabilité

Les classes de stabilité

Météorologie
Nationale

Instabilité	I	$\frac{\Delta T}{\Delta z} < -0.98 \text{ °C} / 100 \text{ m}$
<p>Vents moyens ou forts Nord ou Sud Conditions favorables à la dispersion de polluants Conditions rares jour et nuit</p>		
Neutre	N	$-0.98 \text{ °C} / 100 \text{ m} < \frac{\Delta T}{\Delta z} < -0.55 \text{ °C} / 100 \text{ m}$
<p>Vents moins forts Conditions plus fréquentes jour et nuit</p>		
Stabilité 1	S1	$-0.55 \text{ °C} / 100 \text{ m} < \frac{\Delta T}{\Delta z} < 0 \text{ °C} / 100 \text{ m}$
<p>Vents faibles ou calmes Nord-Sud, Est</p>		
Stabilité 2	S2	$\frac{\Delta T}{\Delta z} > 0 \text{ °C} / 100 \text{ m}$
<p>Vents très faibles ou calmes Nord, Nord-Est, Sud</p>		

Nuclear Regulatory Commission Classification de Pasquill

La classe D peut généralement être utilisée indépendamment du vent pour une nuageuse jour ou nuit et pour des conditions météorologiques de nuit.

Classification	Classes de Pasquill	Variation de la température avec l'altitude °C/100 m
Très instable	A	< -1.9
Moyennement instable	B	-1.9 à -1.7
Faiblement instable	C	-1.7 à -1.5
Neutre	D	-1.5 à -0.5
Faiblement stable	E	-0.5 à 1.5
Moyennement stable	F	1.5 à 4
Très stable	G	> 4

Vitesse du vent (m.s ⁻¹)	Ensoleillement			Conditions de nuit	
	Fort	Modéré	Faible	Faible couverture nuageuse (4/8)	Couverture nuageuse (3/8)
< 2	A	A - B	B	F	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 4	B	B - C	C	D	E
4 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

A : extrêmement instable
 B : modérément instable
 C : légèrement stable
 D : stabilité neutre
 E : légèrement stable
 F : modérément stable.



Formules de Briggs (1973)

Coefficients de dispersion – Source continue

Classes de stabilité Pasquill-Gifford	σ_y (m) x (m)	σ_z (m) x (m)
Conditions rurales		
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$
Conditions urbaines		
A – B	$0.32x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1 + 0.0001x)^{+1/2}$
C	$0.22x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$
E - F	$0.11x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$

A : extrêmement instable - B : modérément instable - C : légèrement stable

D : stabilité neutre - E : légèrement stable - F : modérément stable

Formules de Briggs (1973)

Coefficients de dispersion – Source instantanée

Classes de stabilité Pasquill-Gifford	σ_x (m) ou σ_y (m)	σ_z (m) x (m)
A	$0.18x^{0.92}$	$0.60x^{0.75}$
B	$0.14x^{0.92}$	$0.53x^{0.73}$
C	$0.10x^{0.92}$	$0.34x^{0.71}$
D	$0.06x^{0.92}$	$0.15x^{0.70}$
E	$0.04x^{0.92}$	$0.10x^{0.65}$
F	$0.02x^{0.89}$	$0.05x^{0.61}$

A : extrêmement instable - B : modérément instable - C : légèrement stable
D : stabilité neutre - E : légèrement stable - F : modérément stable



Nombre de Richardson

Le nombre de Richardson est défini par :

$$Ri = \frac{N^2}{S^2}$$

Avec $S = \frac{\partial u}{\partial z}$: cisaillement vertical du vent de vitesse u

et $N^2 = \frac{g}{T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} \right]$ fréquence de Brunt-Väisälä

N^2 représente la fréquence d'oscillation d'une particule fluide déplacée verticalement autour de sa position d'équilibre



Stabilité atmosphérique et nombre de Richardson

$$N^2 = \frac{g}{T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{adiab}} \right]$$

- **Si $N^2 < 0$ soit $Ri < 0$**
 - ▶ Atmosphère instable
 - ▶ La particule déplacée de son état initial s'éloigne irréversiblement
 - ▶ La turbulence est soutenue par la convection

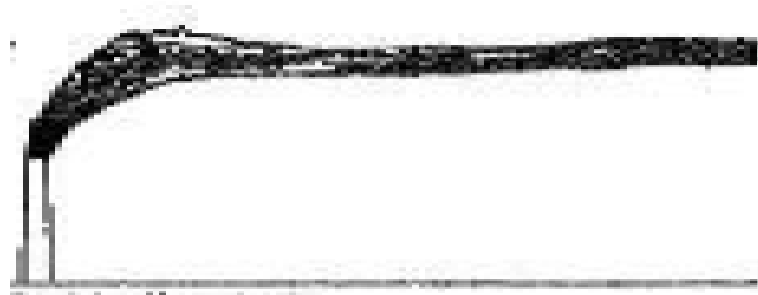
- **Si $N^2 = 0$ soit $Ri = 0$**
 - ▶ Stabilité neutre
 - ▶ La particule déplacée demeure à sa nouvelle altitude.

- **Si $N^2 > 0$ soit $Ri > 0$**
 - ▶ Oscillation de la particule autour de son état initial.

Conditions de forte stabilité (vent modéré)

$$Ri > 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} > -1^\circ\text{C} / 100\text{m}$$



- ▶ Configuration nuit claire ou peu après le coucher du soleil ou peu après le lever du soleil
- ▶ Couche limite atmosphérique stable
- ▶ Les transferts turbulents sont beaucoup plus faibles dans la direction verticale que dans la direction transversale
- ▶ Le panache peut être animé de fluctuations latérales de grande période

Conditions de stabilité neutre (vent fort)

$Ri = 0$



- ▶ Couverture nuageuse importante
- ▶ Couche limite atmosphérique neutre
- ▶ Turbulence d'origine dynamique

Conditions de forte instabilité (vent faible)

$$Ri < 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} < -1^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$$

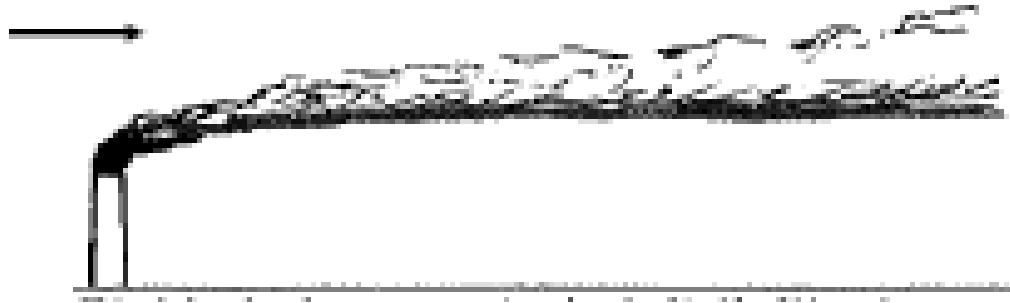


- ▶ Panache en configuration ciel clair – rayonnement solaire intense
- ▶ Couche limite atmosphérique instable
- ▶ Polluants dispersés rapidement verticalement



- ▶ Panache très ouvert
- ▶ Part importante du produit émis se disperse sur le sol

Conditions d'inversion au-dessous du sommet de la cheminée et instabilité au-dessus



- ▶ Couche stable à partir du sol qui s'observe souvent vers la fin de l'après-midi
- ▶ Cas **très favorable** : la plus grande partie du panache est diffusée verticalement vers le haut, la diffusion vers le sol étant bloquée par la couche d'inversion

Conditions d'inversion au-dessus du sommet de la cheminée et instabilité au-dessous (1/2)



- ▶ Couche instable à partir du sol qui s'observe souvent dans la matinée
- ▶ Lorsque la limite supérieure de la couche instable atteint le niveau du panache, les parties les plus basses sont suffisamment diffusées vers le sol assez rapidement alors que la partie supérieure reste intacte

Conditions d'inversion au-dessus du sommet de la cheminée et instabilité au-dessous (2/2)

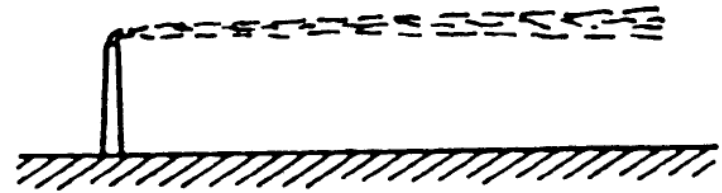


- ▶ A la limite, tout le panache sera situé dans la couche instable : c'est le cas du **trapping** ou la limite inférieure de la couche stable joue le rôle d'un plafond fictif
- ▶ La couche d'inversion bloque les phénomènes d'ascendance
- ▶ Conditions **très défavorables** (dites de fumigation)

Synthèse de la stabilité atmosphérique

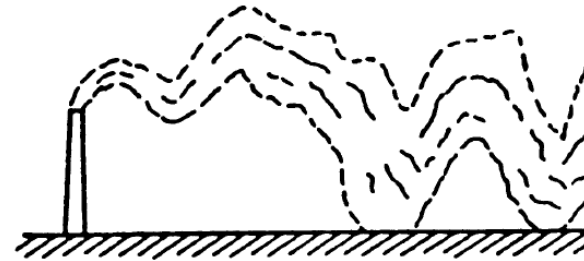
Atmosphère stable

- ▶ Non Favorable à la dispersion
- ▶ Nuit – ciel dégagé



Atmosphère instable

- ▶ Favorable à la dispersion
- ▶ Journées bien ensoleillées



Situation neutre

- ▶ Dispersion pas très importante
- ▶ Ciel couvert, périodes de pluie, vitesse vent élevée

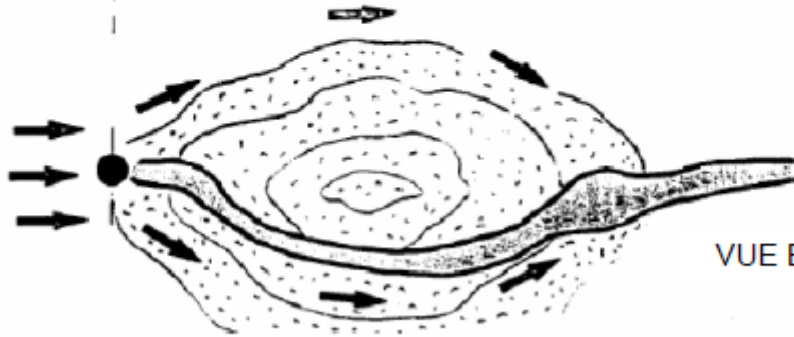
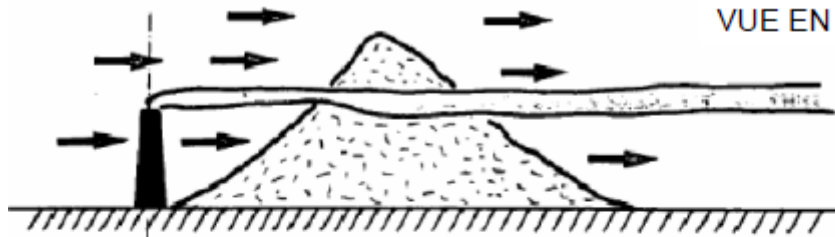


Effet du relief

Atmosphère stable

L'effet de colline

VUE EN COUPE



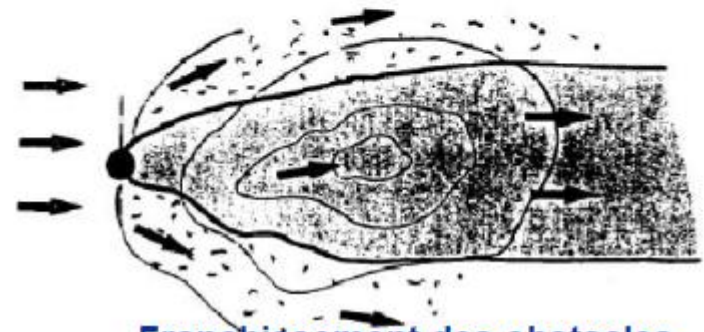
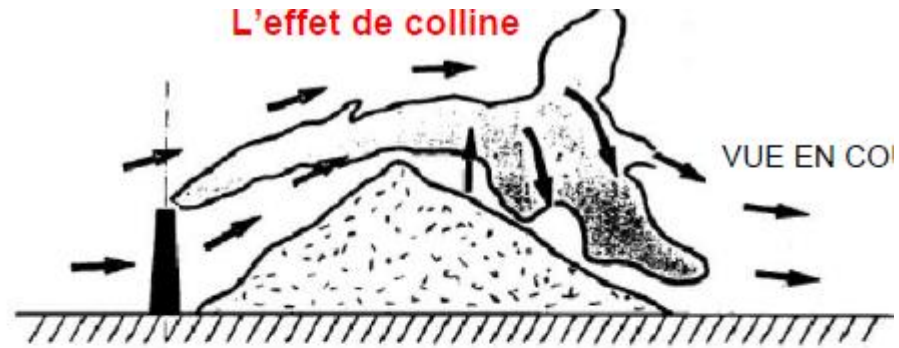
VUE EN PLAN

Contournement des obstacles

Atmosphère instable

L'effet de colline

VUE EN COUPE



VUE EN PLAN

Franchissement des obstacles



Modélisation : principes généraux



Modélisation

Avantages de la modélisation :

- ▶ Non recours à de lourdes techniques expérimentales
- ▶ Rapidité de l'étude
- ▶ Possibilité d'envisager un grand nombre de situations

MAIS ATTENTION

- ▶ Aux hypothèses
- ▶ Aux domaines de validité



Étapes de la modélisation

Caractériser un « terme source » : conditions initiales de dispersion

- ▶ Débit à la brèche, état physique, température, fraction liquide, vitesse, ...
- ▶ Obstacles, dispositif de sécurité, ...

Evaluer la « propagation » de ce terme source dans l'environnement

- ▶ Concentrations en fonction du temps et de l'espace
- ▶ Météo, relief, rugosité, ...

Estimer « les distances d'effets » du phénomène

- ▶ Seuils d'effets, doses, ...



Présentation générale

Les gaz intervenant dans la plupart des accidents se comportent comme des gaz lourds

- ▶ soit à cause de leur masse volumique,
- ▶ soit à cause de leur température de stockage,
- ▶ soit parce qu'ils s'apparentent à un aérosol.

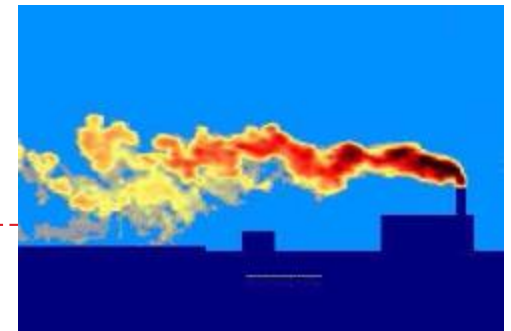
La dispersion atmosphérique des gaz est analysée le plus souvent en termes de gaz lourds.



-
- Problème complexe, tridimensionnel et instationnaire.
 - Le nuage, évoluant suivant un mouvement horizontal sous l'influence de sa densité, est déformé par l'écoulement ambiant et dilué par la turbulence dont l'existence est directement liée au gradient de densité sur la verticale.
 - La dispersion de gaz est décrite suivant trois ou quatre phases correspondant chacune à un phénomène physique dominant par rapport aux autres (Rottman 1982, Hanna et Drivas 1987).



-
- La majorité des modèles incorpore seulement quelques processus physiques connus comme étant les plus importants :
 - ▶ la poussée, la turbulence, le type de rejet.
 - Cependant, il n'est pas toujours certain que tous les phénomènes physiques soient correctement paramétrés et ainsi les non-identifiés peuvent devenir majeurs.
 - Il est souhaitable que les modèles soient capables de prévoir la taille d'ensemble et la forme du nuage comme une fonction du temps et de fournir des estimations des propriétés de turbulence dans le nuage.



Catégories de modèles

Différences entre les modèles

- ▶ Manière de traiter la turbulence
- ▶ Manière de traiter l'effet de la turbulence sur la vitesse de dilution du nuage

Modèles Gaussiens

- ▶ Modèles de dispersion passive
- ▶ Dispersion pilotée uniquement par la turbulence atmosphérique
- ▶ Validité : 100 m à 10 km

Modèles intégrales

- ▶ Equations de la mécanique des fluides simplifiées
- ▶ Validité : 20 m à 10 km

Modèles 3D ou CFD

- ▶ Prise en compte des effets de turbulence, de terrains non- uniformes, d'échanges de chaleur....
- ▶ Validité : 1 cm à 2 km



Modèle Gaussien



Modèle Gaussien

Principes

- ▶ Solution de l'équation de dispersion : loi de distribution gaussienne dans l'espace

Applications

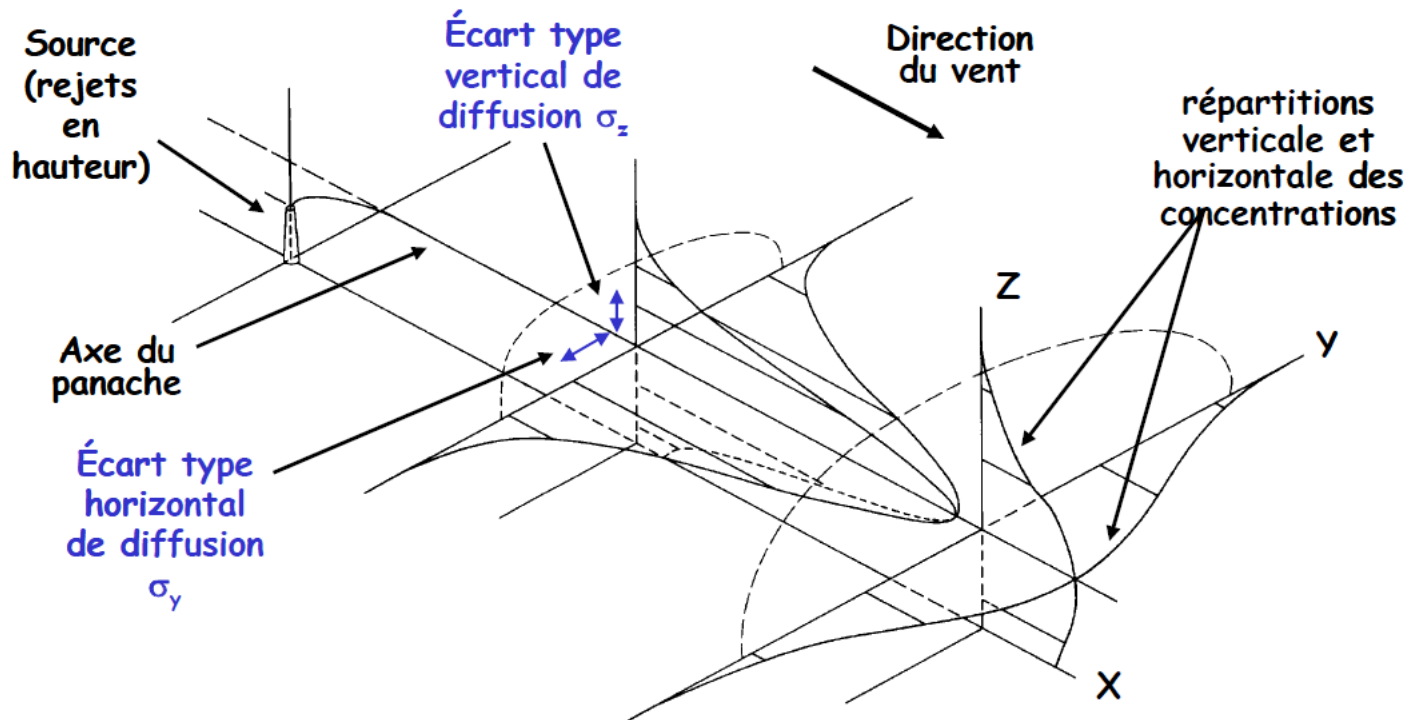
- ▶ Gaz passif (rejet de gaz dont la densité est voisine de celle de l'air)
- ▶ Rejet simple dans un environnement sans obstacles

Hypothèses et limitations

- ▶ Néglige la diffusion moléculaire
- ▶ Champs de vent uniforme (en vitesse et direction) dans le temps et l'espace
- ▶ Pas d'obstacles, pas de relief
- ▶ Turbulence homogène et isotrope
- ▶ Distances supérieures à 100 m



Paramètres nécessaires



Dispersion de gaz (léger) – Source continue - Plume Modèle

- Variable importante: hauteur de la source / sol (hauteur de la cheminée)
- Evolution du panache liée directement
 - ▶ à la quantité de mouvement du rejet (masse de gaz libérée x vitesse à la sortie)
 - ▶ aux forces de poussée (différence de densité, température)
 - ▶ en général $T_{\text{sortie}} \text{ du gaz} > 10 \text{ à } 15 \text{ } ^\circ\text{C de } T_{\text{air}}$ → forces de poussée prédominent
- Forces de quantité de mouvement : 30-40 secondes
- Forces de poussée : 3-4 minutes

Cas des cheminées - terme correctif - diminution de la hauteur par effet de vortex

Près de la partie supérieure de la cheminée H_s , un vortex latérale fait **diminuer** la hauteur du rejet

$$\Delta H = H_s + 2d \left(\frac{u_s}{u} - 1.5 \right)$$

d : diamètre interne de la cheminée (m)

H_s : hauteur de la cheminée (m)

u_s : vitesse de sortie du gaz (m.s^{-1})

u : vitesse du vent (m.s^{-1})

Condition : $u_s < 1.5 u$



Cas des cheminées - terme correctif - augmentation de la hauteur

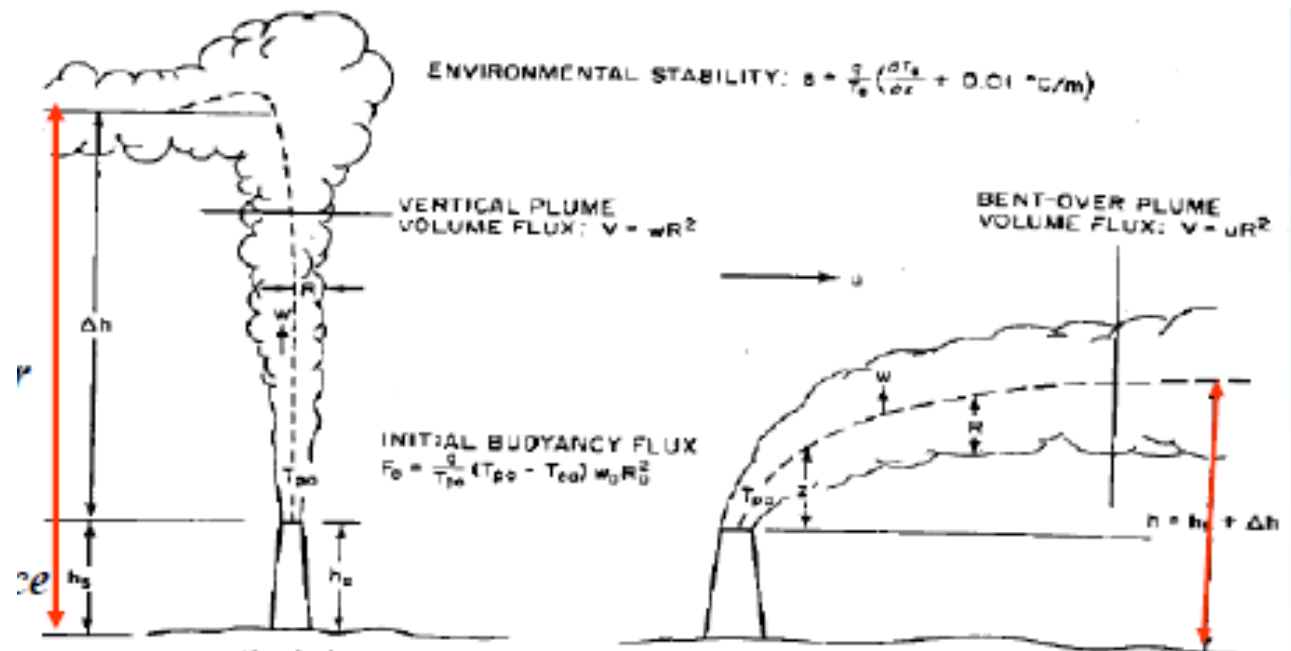
Hauteur effective H

=

Sur-hauteur ΔH

+

Hauteur source H_s



Equation Holland

$$\Delta H = \frac{u_s d}{u} \left[1.5 + 2.68 P d \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \right]$$

d : diamètre interne de la cheminée (m)

P : pression atmosphérique (bar)

T_s : température du gaz à l'intérieur de la cheminée (K)

T_a : température de l'air (K)

u_s : vitesse de sortie du gaz (m.s⁻¹)

u : vitesse du vent (m.s⁻¹)

Condition : $u_s \geq 1.5 u$



Evolution du panache par poussée et quantité de mouvement

L'évolution du panache est pilotée par les forces de poussée si le critère est vérifié :

$$(T_s - T_a) \geq \Delta T_c$$

T_s : température du gaz libéré (K)

T_a : température de l'air (K)

► Stabilités A, B, C ou D :

$$\Delta T_c = 0.0297 T_s \left(\frac{u_s}{d^2} \right)^{1/3} \quad \text{si } F_b < 55$$

$$\Delta T_c = 0.00575 T_s \left(\frac{u_s}{d^2} \right)^{1/3} \quad \text{si } F_b \geq 55$$

$$F_b = g u_s d^2 \left(\frac{T_s - T_a}{4 T_s} \right)$$



$$(T_s - T_a) \geq \Delta T_c$$

► Stabilités E ou F :

$$\Delta T_c = 0.019582 T_s u_s \sqrt{s} \quad \text{avec} \quad s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

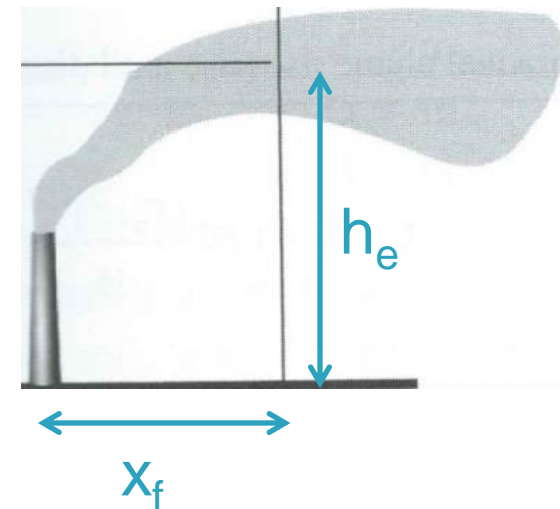
$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0.020 \text{ K.m}^{-1}, \text{ classe E}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0.035 \text{ K.m}^{-1}, \text{ classe F}$$

Distances maximales

- ▶ Distance maximale x_f : distance aval depuis la source pour laquelle le panache a atteint sa taille maximale

Phénomène pilote	Classes A, B, C, D	Classes E, F
Poussée	$F_b < 55 : x_f = 49 F_b^{5/8}$ $F_b \geq 55 : x_f = 119 F_b^{2/5}$	$x_f = 2.0715 \frac{u_s}{\sqrt{s}}$ $s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z}$
Quantité de mouvement	$F_b = 0 : x_f = \frac{4d(u_s + 3u)^2}{u_s u}$ $F_b < 55 : x_f = 49 F_b^{5/8}$ $F_b \geq 55 : x_f = 119 F_b^{2/5}$	$x_f = 0.50 \pi \frac{u_s}{\sqrt{s}}$



Hauteur du panache jusqu'à la distance x_f

Phénomène pilote	Classes A, B, C, D	Classes E, F
Poussée	$h_e = (\Delta H + H_s) + 1.60 \frac{(F_b x^2)^{1/3}}{u}$	
Quantité de mouvement	$h_e = (\Delta H + H_s) + 1.60 \left(\frac{3F_m x}{\beta^2 u^2} \right)^{1/3}$	$h_e = (\Delta H + H_s) + \left(3F_m \frac{\sin(x\sqrt{s}/x)}{\beta^2 u \sqrt{s}} \right)^{1/3}$

$$s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$$\beta = \frac{1}{3} + \frac{u}{u_s}$$

$$F_m = u_s^2 d^2 \left(\frac{T_a}{4T_s} \right)$$



Hauteur finale du panache au-delà de la distance x_f

Phénomène pilote	Classes A, B, C, D	Classes E, F
Poussée	$F_b < 55: h_e = (\Delta H + H_s) + 21.425 \frac{F_b^{3/4}}{u}$ $F_b \geq 55: h_e = (\Delta H + H_s) + 38.710 \frac{F_b^{3/5}}{u}$	$h_e = (\Delta H + H_s) + 2.60 \left(\frac{F_b}{us} \right)^{1/3}$
Quantité de mouvement	$h_e = (\Delta H + H_s) + 3d \frac{u_s}{u}$	<p>la plus petite valeur :</p> $h_e = (\Delta H + H_s) + 3d \frac{u_s}{u}$ $h_e = (\Delta H + H_s) + 1.5 \left(\frac{F_m}{u\sqrt{s}} \right)^{1/3}$

$$s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

$$F_m = \frac{1}{3} + u_s^2 d^2 \left(\frac{T_a}{4T_s} \right)$$

Equation de concentration : modèle gaussien

- ▶ Sutton 1932 - Pasquill 1961,1974 - Doury 1977, 1986

Les écarts-type dépendent de :

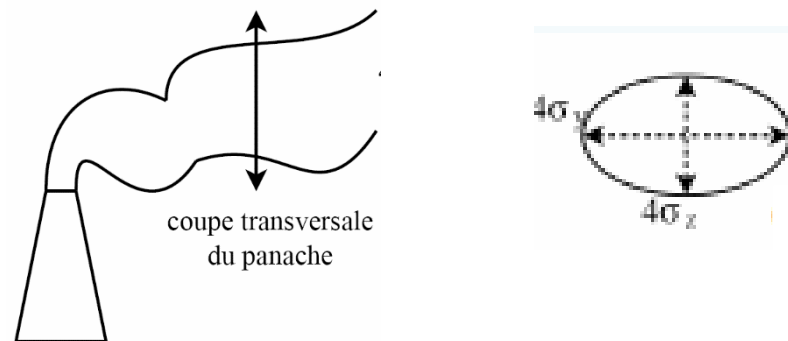
- ▶ la distance de la source
- ▶ du temps de transfert (temps écoulé depuis l'émission)
- ▶ des conditions atmosphériques



- Pour une source continue libérant un produit avec un débit Q_m , la concentration au point de coordonnées (x,y,z) est définie par :

$$c(x,y,z,h) = \frac{Q_m}{2 \pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2 \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2 \sigma_z^2}\right) \right]$$

où σ_x , σ_y et σ_z sont les écarts-types \Rightarrow indicateurs de la dispersion, étalement du produit \Rightarrow **coefficient σ de dispersion (m)**



-
- ▶ La distance correspondante à la concentration moyenne maximale au sol le long de l'axe x est donnée par :

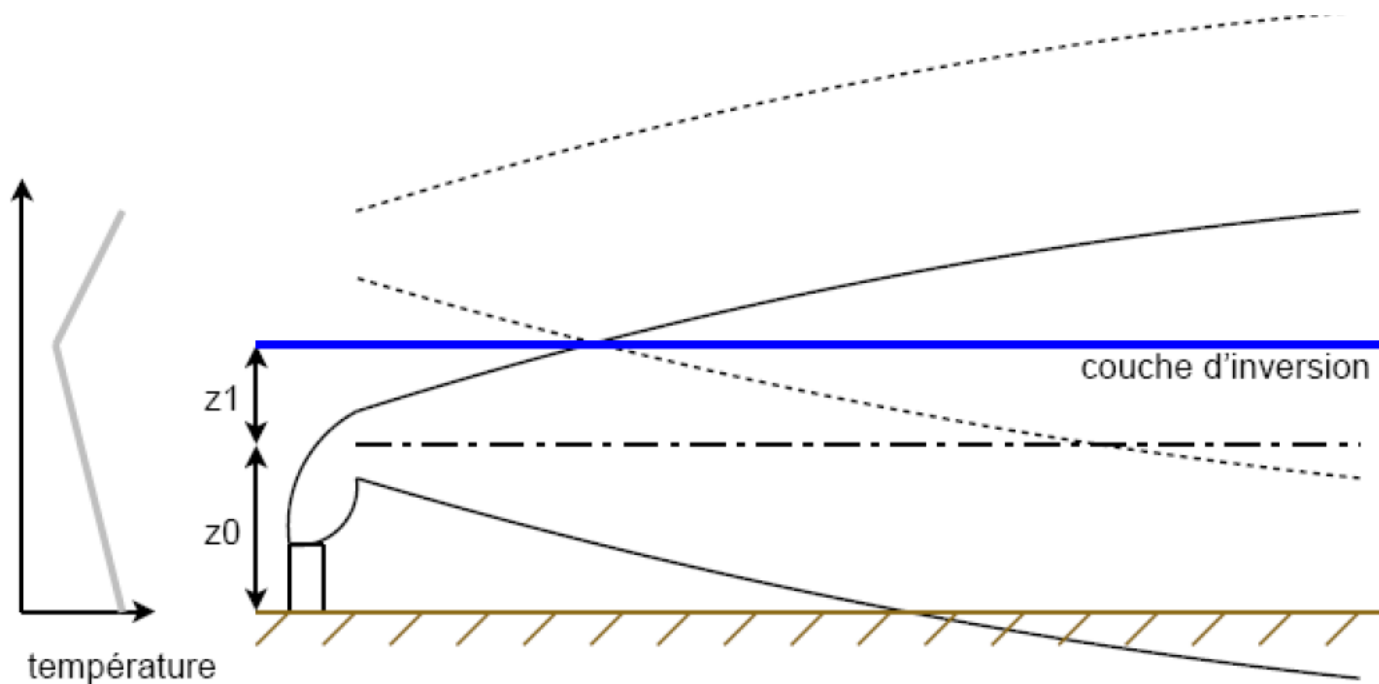
$$\sigma_z = \frac{H}{\sqrt{2}}$$

- ▶ La concentration moyenne maximale au sol le long de l'axe x est :

$$c(x,0,0) = \frac{2 Q_m}{e \pi u H^2} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right)$$

Réflexion parfaite sur la couche d'inversion (pas de perte) : source virtuelle placée en $z_0 + 2 z_1$

$$c(x) = \frac{\dot{Q}_m}{2 \pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2 \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z-z_0-2z_1)^2}{2 \sigma_z^2}\right) \right]$$



Cas d'une source au niveau du sol

$$c(x, y, z) = \frac{Q_m}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2 \sigma_z^2}\right)$$

Modèle Gaussien Plume

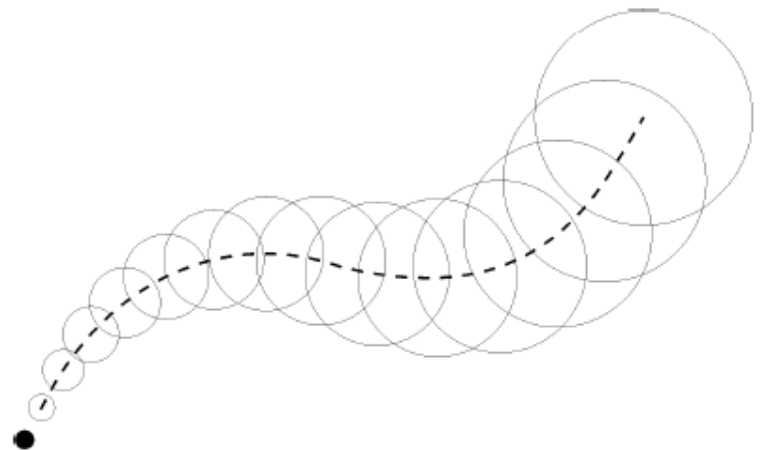
Avantages et Inconvénients

Avantages	Inconvénients
Expressions analytiques	Source continue Pas d'obstacles, pas de relief
Simplicité de programmation	Champ de vent uniforme (vitesse et direction)
Temps de calcul faible	
Littérature abondante pour les paramètres	Qualité des résultats dépend des paramètres



Dispersion de gaz (léger) – Source instantanée - Puff Modèle

- Une bouffée ponctuelle est émise dans N_{puff} intervalles de temps successifs Δt_{puff} de durée et contient $M = Q \times \Delta t_{\text{puff}}$
- Chaque bouffée évolue de manière indépendante selon un modèle gaussien
- La concentration en un point est calculée en sommant sur l'ensemble des bouffées i



Types de bouffées

- ▶ Rejet à une température beaucoup plus élevée qu'à une température ambiante
- ▶ Rejet suite à une détonation ou combustion d'une durée inférieure à 15 s



Terme de poussée due à l'énergie ΔH :

$$F_{bi} = \frac{g M_i \Delta H}{\pi \rho_a c_{pa} T_a}$$

g : terme de gravité

M_i : masse totale dans la bouffée (kg)

ΔH : énergie libérée ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

ρ_a : masse volumique de l'air ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

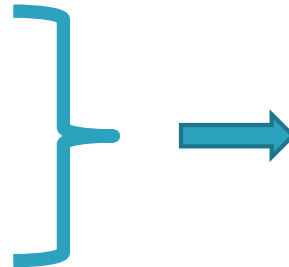
c_{pa} : chaleur spécifique de l'air ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_a : température de l'air (K)

$$F_{bi} = \frac{gM_i}{\pi \rho_a c_{pa} T_a} \Delta H$$

avec $\Delta H = c_{pgaz} (T_{gaz} - T_a)$

et hypothèse: $c_{pgaz} = c_{pa}$



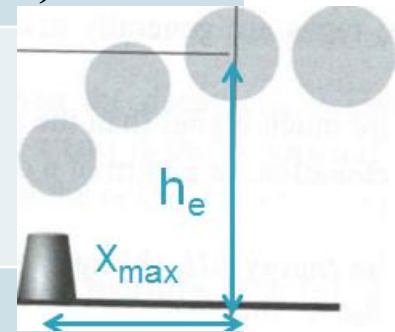
$$F_{bi} = \frac{gM_i}{\pi \rho_a} \frac{(T_{gaz} - T_a)}{T_a}$$

- ▶ Cas des explosions, pour éviter des surestimations

$$F_{bi} = \frac{3}{4} \frac{gM_i}{\pi \rho_a c_{pa} T_a} \Delta H$$

Grandeurs caractéristiques de l'ensemble des bouffées

Classes A, B, C, D	Classes E, F
<p>Hauteur pour $x \leq x_{\max}$</p> $h_e = h_s + \left(\frac{2F_{bi} x^2}{c^3 u^2} \right)^{1/4}$	$h_e = h_s + \left(\frac{4F_{bi}}{c^3 s} \left[1 - \cos \left(\frac{x \sqrt{s}}{u} \right) \right] + \left(\frac{R}{c} \right)^4 \right)^{1/4} - \frac{R}{c}$
<p>Valeur de x_{\max}</p> <p>$F_{bi} \leq 300u^{2/3} : x_{\max} = 12 F_{bi}^{1/2} u^{1/3}$</p> <p>$F_{bi} > 300u^{2/3} : x_{\max} = 50 F_{bi}^{1/4} u^{1/2}$</p>	$x_{\max} = \frac{\pi u}{\sqrt{s}}$
<p>Hauteur finale pour $x > x_{\max}$</p> $h_e = h_s + \left(\frac{2F_{bi} x_{\max}^2}{c^3 u^2} \right)^{1/4}$	$h_e = h_s + \left(\frac{8F_{bi}}{c^3 s} + \left(\frac{R}{c} \right)^4 \right)^{1/4} - \frac{R}{c}$



c coefficient d'entraînement instantané, par défaut $c = 0.64$ m

$$s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

Equation de concentration

Pour une source instantanée libérant une masse totale M_i (kg), la concentration C (kg,m⁻³) au point de coordonnées (x,y,z) et à un temps t est définie par :

$$c = \frac{M_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(h_e - z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(h_e + z)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

où σ_x , σ_y et σ_z sont les écarts-types

► Cas d'une source au niveau du sol :

$$c = \frac{M_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Vitesse moyenne du vent

Vitesse moyenne de vent calculée entre la hauteur de la bouffée la plus basse et la hauteur de la bouffée la plus haute.

$$\bar{u} = \frac{u_{\text{ref}}}{(z_t - z_b) z_{\text{ref}}^p (1+p)} (z_t^{1+p} - z_b^{1+p})$$

si $h_e - 2.15 \sigma_z > 2$: $z_b = h_e - 2.15 \sigma_z$

si $h_e - 2.15 \sigma_z \leq 2$: $z_b = 2\text{m}$

si $h_e + 2.15 \sigma_z < h_e^{\text{max}}$: $z_t = h_e + 2.15 \sigma_z$

si $h_e + 2.15 \sigma_z \geq h_e^{\text{max}}$: $z_t = h_e^{\text{max}}$

h_e^{max} hauteur finale du panache de bouffée

Temps spécifiques

On définit à un point $(x, 0, h_e)$ le temps spécifique :

- d'arrivée de la bouffée
- de départ de la bouffée de ce même point (x, y, z)
- de concentration maximale dans la bouffée

$$t_a = \frac{x - 2.45\sigma_x}{\bar{u}}$$

$$t_d = \frac{x + 2.45\sigma_x}{\bar{u}}$$

$$t_{\max} = \frac{x}{\bar{u}}$$



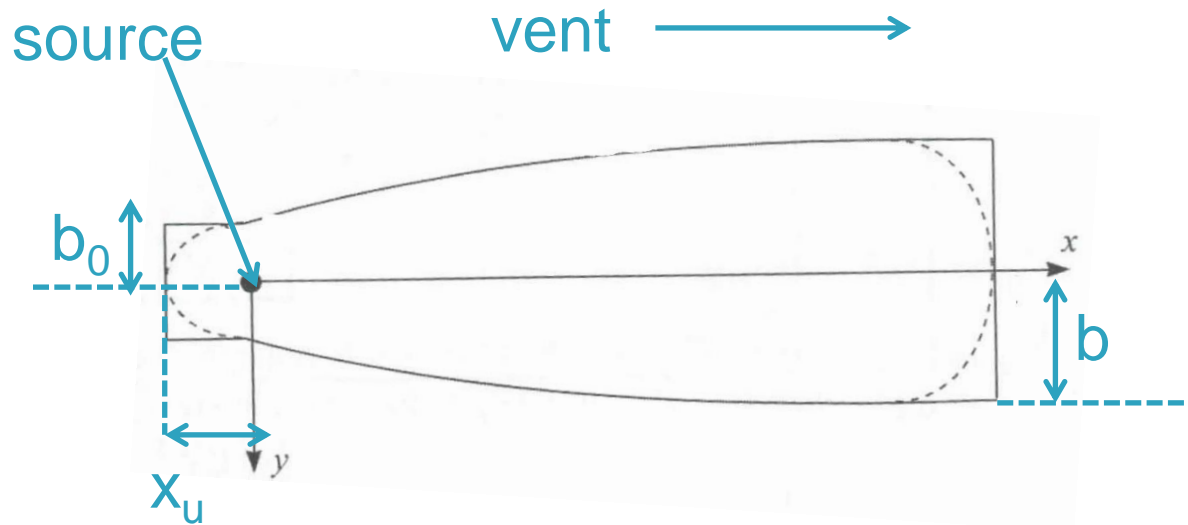
Modèle Gaussien Puff

Avantages et Inconvénients

Avantages	Inconvénients
Emissions qui varient dans le temps	Nombre de sources limité
Facilité d'implantation	Champ météorologique uniforme dans une bouffée
Champ météorologiques varient d'une bouffée à l'autre et dans le temps	Pas d'obstacles, pas de relief
Possibilité de rajouter des processus spécifiques (dépôt, décroissance)	De manière approximative



Dispersion de gaz lourd – Source continue



Rejet continue de gaz par une source de rayon initial b_0 (m)

La dispersion prend place à une distance x_u

Le nuage formé est considéré comme plat.

Dispersion de gaz lourd – Source continue

Critère de source continue:

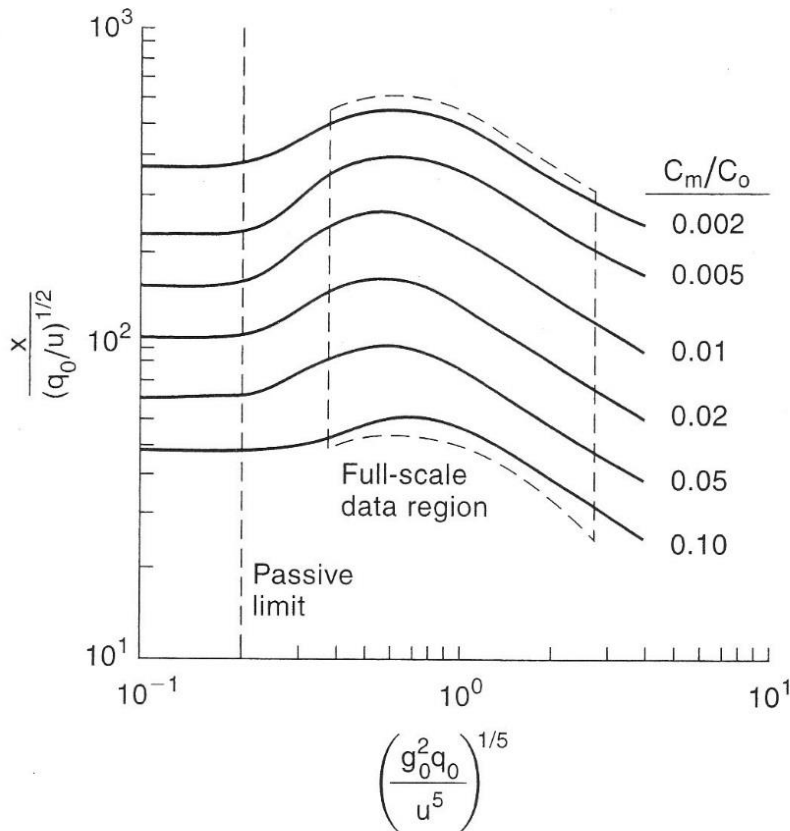
$$\left(\frac{g_0 q_0}{u^3 D_c} \right)^{1/3} \geq 0.15 \quad \text{avec} \quad D_c = \left(\frac{q_0}{u} \right)^{1/2}$$

$$g_0 = \frac{g(\rho_{\text{gaz}} - \rho_a)}{\rho_a} \quad g_0 \text{ correction de la gravité}$$

q_0 le débit volumique du panache initial ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

u vitesse du vent à 10 m d'altitude ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

D_c dimension caractéristique de la source pour un rejet de gaz dense continue (-)



C_{max} concentration maximale en x ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

C_0 concentration initiale à la source ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

-
- ▶ Largeur b du nuage en x

$$b = 2b_0 + 8L_b + 2.5L_b^{1/3} x^{2/3}$$


avec $L_b = \frac{g_0 q_0}{u^3}$

- ▶ Hauteur b_z du nuage

$$b_z = \frac{q_0}{2ub}$$

- ▶ Distance maximale x_{\max} de dispersion

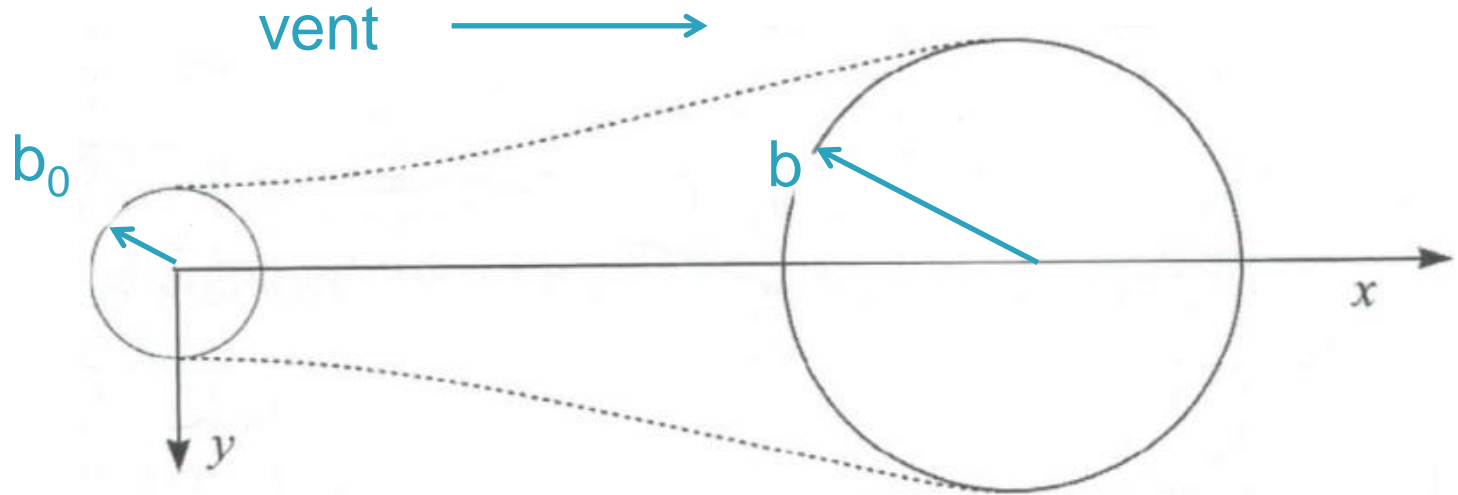
$$x_u = b_0 + 2L_b$$



Applicable si à une distance x la durée de la dispersion est

$$t_r (s) > 2.5 \frac{x}{u}$$

Dispersion de gaz lourd – Source instantanée



Rejet instantané d'un volume V_0 (m^3) de gaz conduit à un panache de rayon initial b_0 (m)

Le centre du panache se déplace selon x tandis que le rayon b (m) augmente avec x .

Dispersion de gaz lourd – Source instantanée

Critère de source instantanée

$$\frac{\sqrt{g_0 V_0}}{u D_i} \geq 0.20$$

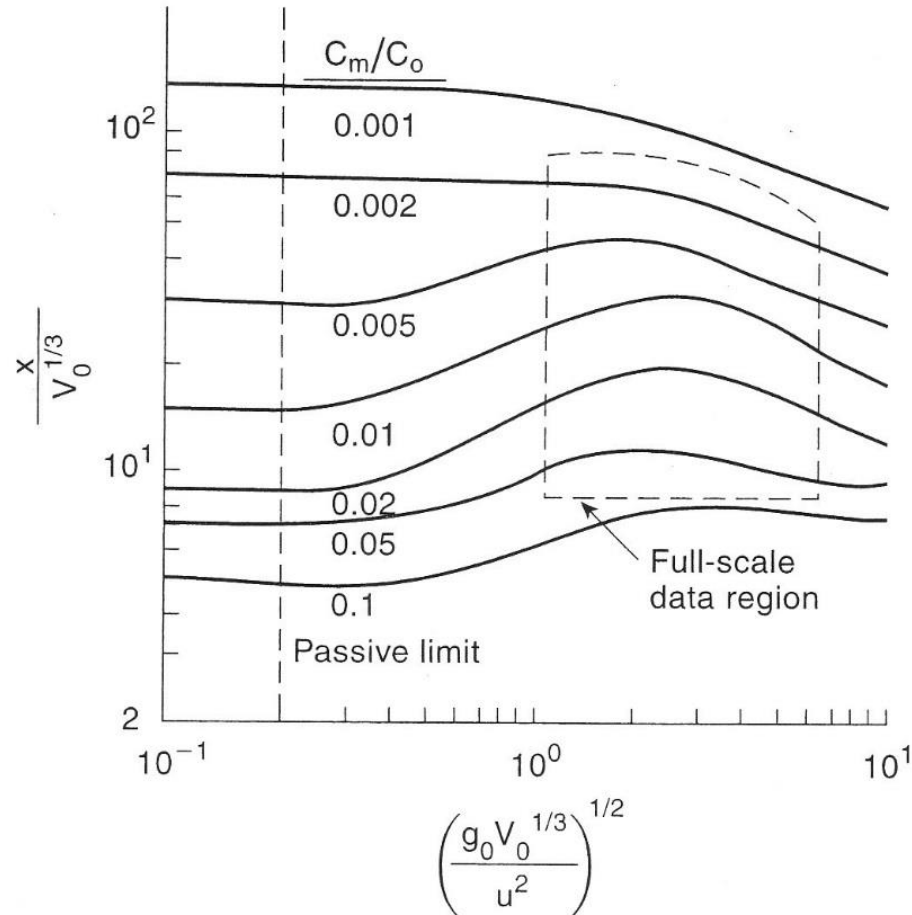
avec $D_i = V_0^{1/3}$

$$g_0 = \frac{g(\rho_{\text{gaz}} - \rho_a)}{\rho_a} \quad g_0 \text{ correction de la gravité}$$

D_i dimension caractéristique de la source pour un rejet de gaz dense instantané (-)

V_0 volume de gaz dense dégagé (m^3)

u vitesse du vent à 10 m d'altitude (m.s^{-1})



C_{max} concentration maximale en x (kg.m^{-3})

C_0 concentration initiale à la source (kg.m^{-3})

-
- ▶ Largeur b de la bouffée en x

$$b = \sqrt{b_0^2 + 1.2 t \sqrt{g_0 V_0}}$$

- ▶ Temps associé à x

$$x = 0.4 u t + b$$

- ▶ Hauteur moyenne de la bouffée b_z

$$b_z = \frac{c_0 V_0}{\pi b^2 c_{\max}}$$

Dispersion de gaz lourd

Rejet non-isotherme

Modèle de Britter-McQuaid

Ajustement sur la concentration si dégagement non-isotherme
dégagement de vapeur

$$c = \frac{c^*}{c^* + (1 - c^*) \left(\frac{T_a}{T_0} \right)}$$

c concentration effective

c^* concentration initiale

T_a température ambiante

T_0 température de la source

Modèle Intégral

Modèle Intégral

Principes

- ▶ Résolution simplifiée des équations de la mécanique des fluides (Van Ulden 1974)

Applications

- ▶ Gaz neutres, gaz denses et parfois gaz légers
- ▶ Dispersion des jets de cheminée appliquée à la dispersion des gaz denses

Hypothèses et limitations

- ▶ Intègre différents modèles (modèle de jet, de gaz dense, de gaz léger...)
 - ▶ effets de turbulence dynamique, pour les rejets sous forme de jet à grande vitesse d'émission ;
 - ▶ effets de gravité, pour les rejets de gaz lourds ;
 - ▶ effets de flottabilité pour les rejets de gaz légers.
- ▶ Modèle gaussien conservé dans la phase finale de la dispersion
- ▶ Approche paramétrique
- ▶ Mauvaise représentation des conditions météorologiques extrêmes
- ▶ Relief et obstacles non pris en compte
- ▶ Inadapté pour des rejets faible vitesse / vent faible (diffusion moléculaire négligée)

Avantage

- ▶ faible coût (matériel + temps machine)

Modèle CFD

Modèle CFD

Principes

- ▶ Résolution des équations de la mécanique des fluides

Applications

- ▶ Prise en compte de l'ensemble des phénomènes intervenant de façon significative sur la dispersion (qu'ils soient liés à l'atmosphère comme la turbulence, ou au site comme les obstacles et le relief)

Hypothèses et limitations

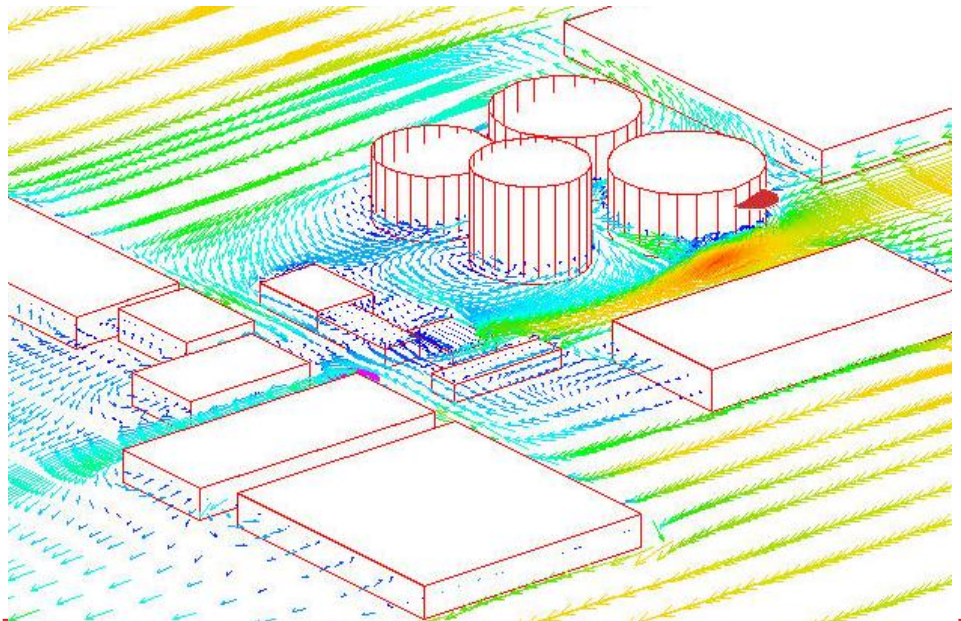
- ▶ Nombreuses données d'entrée à collecter
- ▶ Temps de calcul important
- ▶ Complexité des modèles numériques : nombreux paramètres numériques de « calage »
- ▶ Précision dépendant de la méthode de résolution, du maillage utilisé, du choix des modèles...

Champ de vitesse du vent dans l'espace

- ▶ Equations de conservation
- ▶ Conditions aux limites

Champ des concentrations : bilan de matière

- ▶ Transport du polluant par le courant moyen
- ▶ Diffusion turbulente
- ▶ Diffusion moléculaire
- ▶ Gravité



Modèle CFD

Avantages et Inconvénients

Avantages	Inconvénients
Résolution des équations de la mécanique des fluides	Complexité des modèles numériques
Prise en compte de l'ensemble des processus influençant la dispersion : écoulement, turbulence, obstacles, relief	Temps de calcul élevé Influence du maillage Précision dépendant de la méthode de résolution, choix des modèles
Possibilités de coupler les modèles : chimie, aérosols	
Vrai pour tous les modèles !!!	La modélisation de la turbulence est fondamentale mais reste difficile

Calage et validation

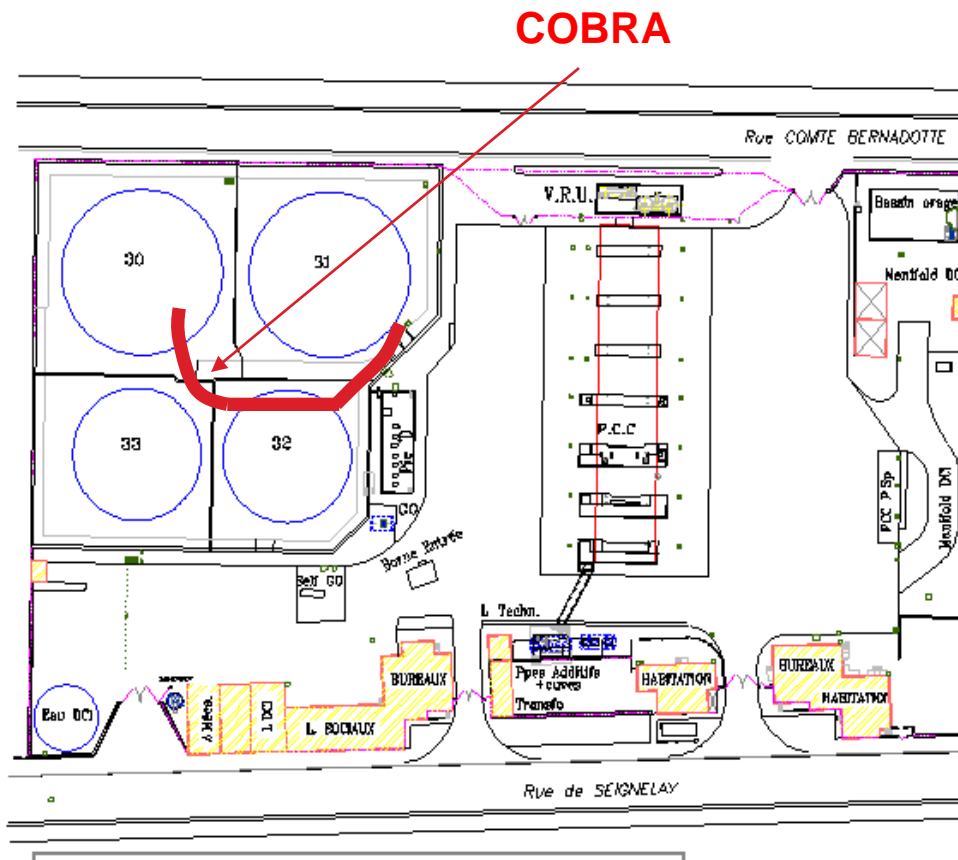
- ▶ Nécessité d'avoir des essais pour caler des modèles
- ▶ Analyse des campagnes expérimentales difficiles : manque de données, pas assez de capteurs, contexte de réalisation
- ▶ Comparaison entre concentrations moyennes calculées et concentrations réelles mesurées difficile à interpréter
- ▶ Problème de reproductibilité d'un essai dans des conditions pourtant quasiment identique
- ▶ Lors des essais, des conditions météo peu fréquentes : stable, vent faible

Exemple

Dispersion de gaz lourd



Dispersion des gaz lourds : dégazage d'un réservoir d'essence



Hypothèses :

- ▶ Effluent : vapeurs d'essence 95
- ▶ Débit : 19 000 m³/h
- ▶ Vitesse du vent : $u = 5$ m/s
- ▶ Température : $T = 15^{\circ}\text{C}$
- ▶ Pression : $P = 1$ atm

Mécanisme de dispersion de gaz lourds

Phases d'évolution d'un panache formé de gaz lourds :

- Phase d'éjection au niveau de la source

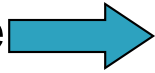
➡ **Phase 1** : influence des caractéristiques de la source (débit, vitesse du rejet, densité)

- Effondrement du nuage
- Rampement sur le sol

➡ **Phases 2 et 3** : couplage des caractéristiques de la source et de l'environnement (vitesse du vent, relief, taux de dilution, densité)

- Dispersion passive ➡ **Phase 4** : influence de l'environnement

Première phase : rejet

- Mouvement du fluide  fonction des conditions de libération du gaz.
- Nuage soumis à deux forces :
 - ▶ la force résistante associée à l'écoulement atmosphérique autour du nuage ;
 - ▶ la force de poussée due à la gravité et à la différence de densité entre le nuage et l'air environnant.
- Une estimation de l'importance de ces forces est donnée par le **nombre de Richardson**

Nombre de Richardson :

$$R_i = g \left(\frac{\rho_0 - \rho_A}{\rho_0} \right) \frac{h_0}{u_0^2}$$

ρ_0 et h_0 : densité et hauteur initiale du nuage,

U_0 : vitesse moyenne caractéristique de l'écoulement ambiant

ρ_A : densité de l'air ambiant.

- Si R_i est petit, le mouvement est déterminé par l'écoulement ambiant. Le nuage ne s'effondre pas, il est transporté.
- Si R_i est grand le mouvement est déterminé par l'effet de gravité et c'est alors que le nuage s'effondre au sol.

Il existe 3 types de dégagement pour lesquels le nombre de Richardson s'applique :

- ▶ dégagement instantané (se produisant en quelques secondes)
- ▶ dégagement continu ou niveau du sol (plusieurs minutes avec peu ou pas de variation dans le débit d'écoulement)
- ▶ jet continu

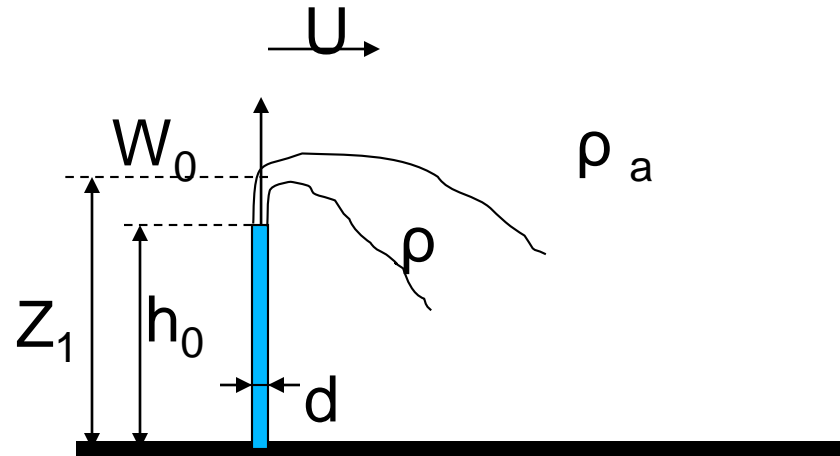
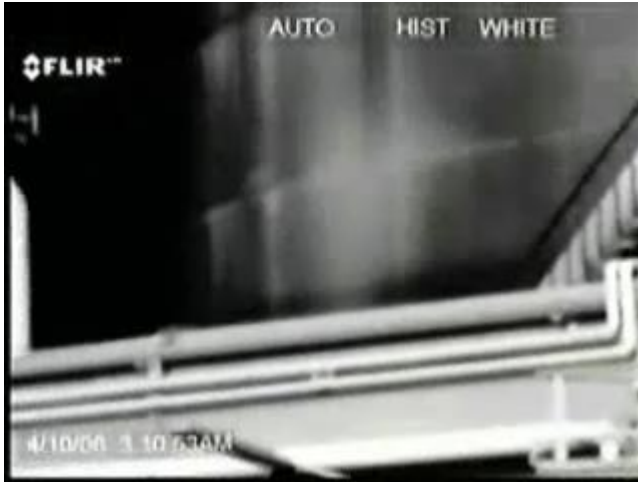
- Dans le cas d'un rejet instantané

si $Ri > 700$: gaz dense

- Dans le cas d'un rejet continu

si $Ri > 32$: gaz dense

Exemple : source isolée – Partie 1 rejet



- Phénomène physique prédominant :

Quantité de mouvement du panache ρW



Fonction du débit et du diamètre de la source

- Paramètre caractéristique :

hauteur atteinte

$$z_1 = f \left(\frac{W_0}{U}, \frac{gd \Delta\rho / \rho_a}{U^2}, \frac{d}{h_0} \right)$$

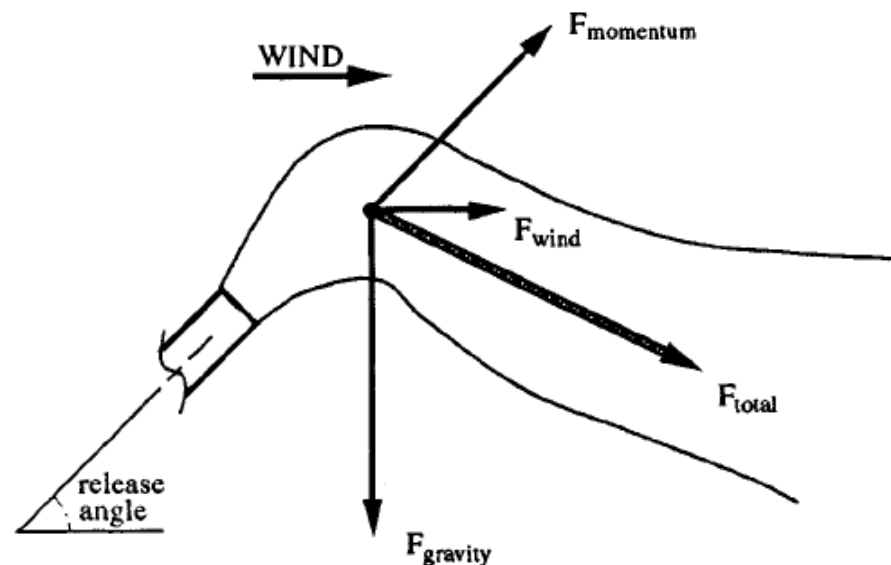
z_1 croît avec $\frac{W_0}{U}$ et d

z_1 décroît avec $\frac{\Delta\rho}{\rho_a}$

Deuxième phase : Effondrement

- Commence lorsque l'accélération verticale devient petite comparée à la gravité réduite.
- Mouvement principalement horizontal.
- Le mélange, pendant cette phase, est dû à la turbulence engendrant un mouvement latéral. Cette turbulence est créée à la surface supérieure du nuage en contact avec l'air.
- La différence de densité engendre des tourbillons et une vitesse d'écoulement qui varie suivant la verticale.

Exemple : source isolée – Partie 2



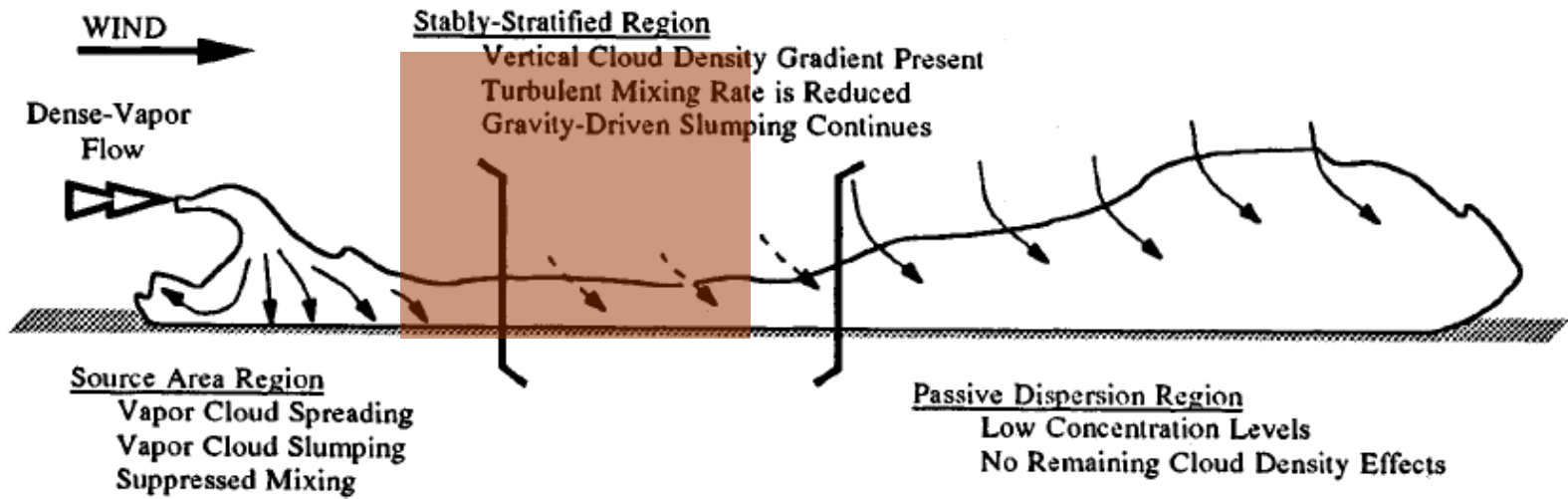
■ Phénomène physique prédominant : Forces de gravité

■ Paramètre caractéristique : Nombre de Froude

$$F_r = \frac{\text{force d'inertie}}{\text{force de gravité}} = \frac{U}{\sqrt{gd}}$$

Troisième 3: Rampement sur le sol

- Transition vers un panache passif
- La poussée existe toujours mais est beaucoup moins forte.



- **Phénomènes physiques prédominants :**
 - ▶ Composante verticale de la quantité de mouvement
 - ▶ Frottement du nuage sur le sol

- **Paramètre caractéristique :**

Coefficient de frottement
139

$$C_f = \frac{\tau}{\rho w^2} \quad \text{avec } \tau \text{ frottement}$$

Quatrième phase : dispersion passive

- traduit la phase passive pour laquelle le nuage est tellement dilué que la poussée devient négligeable.
- Seule la turbulence atmosphérique détermine la dispersion du nuage.