

Introduction à la modélisation de la dispersion atmosphérique

1 Objectifs du TP

Ce travail a pour objectif principal de vous familiariser avec un outil de modélisation de la dispersion atmosphérique à travers l'étude d'un cas concret. Le TP consiste à modéliser la dispersion de polluants autour de l'usine d'incinération de Thiverval-Grignon (78), à côté de Plaisir, sous différentes conditions météorologiques.

Avant la première séance de TP, vous devez :

- avoir lu le texte en entier
- avoir répondu aux questions à préparer, p.3 à p.6

ATTENTION Le rapport devra être rendu à la fin de la dernière séance. À vous de préparer AVANT et ENTRE les séances.

2 Modélisation de la dispersion atmosphérique

La composition chimique de l'air que nous respirons est le résultat de trois phénomènes :

- l'émission de composés, généralement en surface, par des sources de natures très différentes (routes, villes, installations classées, forêts, volcans, . . .)
- le transport de ces composés par l'atmosphère, selon les lois de la mécanique de fluides
- la transformation chimique de certains de ces composés, régie par les réactions de la photochimie atmosphérique.

Si on veut analyser la composition de l'air en un lieu donné et à un instant donné, il est nécessaire de recourir à la modélisation, étant donnée la complexité des phénomènes mis en jeu. Dans ce TP, nous proposons de mettre en œuvre un modèle de transport atmosphérique adapté aux échelles locales à régionales. Ce type de modèle s'appelle généralement modèle de dispersion.

Pour notre étude, nous utilisons un modèle de panache gaussien, adapté à la simulation de la dispersion atmosphérique de polluants à une échelle de 1 km à une dizaine de km (autour de la source). Le modèle utilisé (Impact) est développé par la société ARIA et est utilisé par de nombreux bureaux d'études, notamment pour des études d'impact ou de risque industriel. L'objectif du TP est de réaliser une étude de cas. Le TP se fait sur trois séances en binômes. La première séance est consacrée à la prise en main du logiciel ainsi qu'à la préparation du cas d'étude. Au cours de la deuxième séance, vous testerez

la sensibilité de vos résultats aux nombreux paramètres du modèle et vous les mettez en forme dans un rapport à rendre à la troisième séance.

2.1 Principe de la modélisation du transport atmosphérique

Voir cours IE1.

2.2 Le modèle Impact de dispersion atmosphérique

Impact est un modèle gaussien statistique cartésien. Il permet de calculer les retombées au sol de polluants gazeux passifs (chimiquement) et de poussières (sensibles à la gravité). Pour les vents faibles, un modèle de bouffées gaussiennes est disponible. Les hypothèses de calcul (turbulence homogène dans les basses couches, composante verticale du vent négligeable devant la composante horizontale, régime permanent atteint instantanément) sont en général majorantes. Elles permettent un calcul et une visualisation rapides de l'ordre de grandeur des concentrations sur des domaines de 1 à 30 km. En contrepartie, la météorologie est considérée comme homogène sur le domaine, les bâtiments ne sont pas pris en compte (il n'y a pas d'obstacle dans l'écoulement), la topographie doit rester simple et les résultats sont disponibles uniquement au niveau du sol (pas en 3D).

Le modèle tourne sur un PC et les temps de calculs peuvent varier de quelques secondes pour des cas simples et des événements courts à plusieurs heures selon la taille du domaine et la durée réelle à simuler. La modélisation d'une situation donnée se déroule toujours en trois étapes :

- *Étape 1 : Collecte des données indispensables pour la simulation*

Il s'agit de recueillir des données sur :

- la topographie de la zone d'étude
- les sources présentes dans cette zone
- les conditions météorologiques
- les polluants émis.

La qualité d'une étude de modélisation est déterminée en grande partie par cette première étape qui fournit au modèle les informations dont il a besoin pour tourner. Pour le TP, nous utiliserons des ordres de grandeurs mais dans le cadre d'une étude, cette étape est généralement la plus longue et la plus coûteuse (achat de données, déplacements sur le terrain, ...).

- *Étape 2 : Configuration du logiciel et simulation*

Les informations recueillies sont rentrées dans Impact successivement.

- a) La première étape consiste à déterminer l'extension du domaine d'étude et à obtenir sa topographie à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT). Cette étape a été réalisée préalablement au TP à partir de la base de données ALTI de l'IGN, gratuite à 75 m (disponible sur le site professionnels.ign.fr/bdalti).
- b) Il faut ensuite définir les différentes espèces chimiques d'intérêt par leurs caractéristiques physiques (voir 3.1).

- c) Si nécessaire, il faut connaître le(s) profil(s) temporel(s) des émissions de chaque source : à l'échelle horaire, journalière, mensuelle, annuelle.
 - d) Il faut placer les sources et récepteurs (points auxquels on veut particulièrement étudier les concentrations) dans le domaine.
 - e) Chaque simulation correspond à une situation météorologique qu'il faut définir par le jeu de paramètres le plus adapté (température, nébulosité, vitesse et direction du vent, etc).
- *Étape 3 : Traitement et analyse des résultats*
Pour chaque simulation, Impact permet de visualiser les concentrations au sol et produit un fichier texte contenant, en plus d'un résumé des paramètres choisis, les concentrations aux récepteurs et sous l'axe du panache.

3 Travail à réaliser

3.1 Rappels de cours et questions à préparer avant le TP

Cette partie contient des rappels de cours sur la couche-limite et la stabilité ainsi que des questions à préparer avec les informations contenues dans ce texte ou à rechercher dans la littérature (ou sur internet). Ces questions sont notamment destinées à vous aider à préparer les entrées sous une forme adaptée au logiciel.

3.1.1 Rappels sur la couche-limite et la stabilité

La couche-limite La couche limite atmosphérique (CLA) est la partie inférieure de l'atmosphère, qui est sous l'influence physique et chimique directe des processus de surface. L'épaisseur de la CLA est une notion statistique : au sommet de la CLA se rencontrent de forts gradients (verticaux) des paramètres météorologiques (vent, température, humidité relative) et parfois chimiques (concentrations d'aérosols notamment). L'épaisseur de la CLA varie de quelques centaines de mètres à 2 à 3 km, elle est donc très mince par rapport à la troposphère. Au-dessus de la CLA, on trouve la troposphère libre (sous-entendu : libre de l'influence de la surface). La CLA répond aux changements dans le flux de chaleur de la surface c'est-à-dire qu'elle suit un cycle diurne.

Stabilité Que devient un petit mouvement vertical sous l'effet de la flottabilité (c'est-à-dire la gravité plus la poussée d'Archimède) ? On s'intéresse au cas d'une parcelle d'air qui se déplace de manière adiabatique (les échanges de chaleur avec son environnement sont trop lents par rapport à son mouvement), dont la température est différente de celle de l'air environnant et telle que les pressions de la parcelle d'air et de l'air environnant s'équilibrent à l'interface.

La température de la parcelle qui s'élève pour une raison quelconque suit toujours l'évolution adiabatique de gradient vertical $\frac{\partial T}{\partial z} = -\Gamma$ (trait plein sur la Figure 1). Si on suppose que l'atmosphère est hydrostatique et que l'air est un gaz parfait, le gradient adiabatique de température vaut $-\Gamma = -9,8 \text{ K.km}^{-1}$.

L'air environnant a son propre profil de température (déterminé par les conditions à plus grande échelle), deux cas sont schématisés sur la Figure 1.

- Le profil de température de l'air environnant correspond à la courbe en trait mixte (point-tiret) : on considère une parcelle d'air à la température T_0 à l'altitude z_0 . Cette parcelle d'air s'élève le long de l'adiabatique jusqu'à z' . Sa température à z' est T_p alors que la température de l'air environnant à z' est T' . Comme T' est supérieure à T_p , la parcelle est plus froide donc plus dense que l'air environnant. Elle a donc tendance à redescendre vers z_0 : le mouvement de départ est **inhibé**. Ce cas est dit **stable**, on a

$$\frac{\partial T}{\partial z} > -\Gamma$$

- Le profil de température de l'air environnant correspond à la courbe noire tiretée : on considère une parcelle d'air à la température T_0 à l'altitude z_0 . La parcelle d'air s'élève jusqu'à z' . Sa température à z' est T_p alors que la température de l'air environnant à z' est T' . Comme T' est inférieure à T_p , la parcelle est plus chaude donc moins dense que l'air environnant. Elle a donc tendance à continuer à monter : le mouvement de départ est **amplifié**. Ce cas est dit **instable**, on a

$$\frac{\partial T}{\partial z} < -\Gamma$$

- Le profil de température de l'air environnant correspond à la courbe en trait plein (l'adiabatique) : la température de l'air environnant est la même que celle de la parcelle d'air. Ce cas est dit **neutre**, on a :

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\Gamma$$

Inversion de température On parle d'inversion de température lorsqu'une couche d'air chaud se trouve au-dessus de l'air froid. Dans ce cas, cette couche d'air froide est bloquée puisqu'elle est plus lourde. En particulier, ce phénomène se produit la nuit : le sol se refroidissant plus rapidement que l'air, la couche d'air proche du sol est plus froide que la couche d'air au dessus de celle-ci. Sur la Figure 2, on peut voir que cette couche d'air froide s'épaissit durant la nuit. On remarque aussi une brève inversion de température marquant la limite de la CLA.

Profil vertical de température dans Impact Le logiciel dispose de différentes méthodes pour déterminer la stabilité à partir des données fournies par l'utilisateur. Il s'agit en fait de placer la situation météorologique dans une classe de stabilité (voir annexe A). Une des possibilités est d'imposer le gradient vertical de température $\frac{\partial T}{\partial z}$ dans le domaine en fournissant la température à deux hauteurs.

- Proposer un gradient vertical de température (réaliste) pour une couche instable.
- Proposer un gradient vertical de température positif (réaliste) pour une couche stable.
- Proposer un gradient vertical de température négatif (réaliste) pour une couche stable.

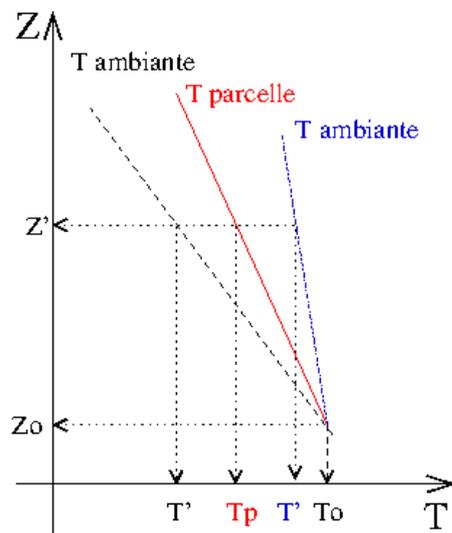


FIGURE 1 – Profils de température et stabilité.

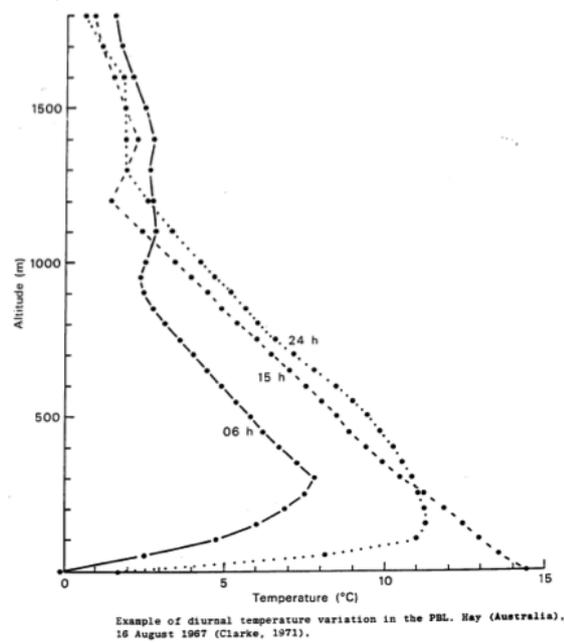


FIGURE 2 – Cycle diurne du profil de température dans la couche limite (profils à 6 h, 15 h et 24 h)

3.1.2 Émissions de l'incinérateur

L'incinérateur a trois cheminées, dont les caractéristiques sont données en annexe B. Les normes fixent des rejets maximum autorisés pour ce type d'installation : un extrait est donné en annexe C. Ces cheminées étant proches les unes des autres, de taille faible devant celle de la zone d'intérêt, elles seront considérées comme situées au même point géographique.

- a) Choisir deux ou trois des polluants documentés dans ces annexes.
- b) Pour chacun des polluants particulaires, chercher, dans la littérature ou sur internet, sa vitesse de dépôt (sec) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et sa masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).
- c) Calculer les émissions des polluants qui vous intéressent en tonnes/an ou en $\mu\text{g}/\text{s}$ (choisir l'unité la plus pertinente selon les informations fournies et les ordres de grandeur) à l'aide des données fournies en annexe B pour chacune des trois cheminées.
- d) Trouver les coordonnées des cheminées en Lambert 93.
Indications : utiliser les ressources du Géoportail (www.geoportail.fr) : afficher la carte IGN et repérer le symbole indiquant les cheminées ; dans la colonne de droite des outils, choisir réglages puis coordonnées du centre de la carte et système de référence : Lambert 93 ; superposer le centre de la carte sur le symbole des cheminées permet d'obtenir alors les coordonnées.

3.1.3 Impact sur les concentrations

On cherche à quantifier l'impact des émissions de l'incinérateur sur les concentrations au niveau d'au moins un lieu accueillant du public, type école, centre hospitalier, complexe sportif. Afin de préparer cette analyse, chercher dans la littérature ou sur internet les informations suivantes :

- a) quelles sont les concentrations de fond (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) des polluants qui vous intéressent en Île-de-France ?
- b) quelles sont les normes de concentration dans l'air extérieur pour ces polluants ?
- c) trouver les coordonnées, en Lambert 93, d'au moins un lieu pertinent situé à 1 à 5 km de l'incinérateur.

3.2 Étude d'impact de l'incinérateur de Thiverval-Grignon

Le travail le plus long consiste normalement à recueillir les données nécessaires à la simulation. Une partie du travail a été faite en amont par les encadrants (MNT du domaine, données météorologiques) et par vous-mêmes (3.1). Il vous reste donc à organiser l'ensemble et à choisir les situations à étudier.

Vous pouvez commencer par une simulation de type académique (un «tir gaussien») avec une atmosphère neutre et le vent dirigé de l'incinérateur vers le(s) lieu(x) étudié(s). Vous ferez ensuite varier notamment les conditions météorologiques telles que vitesse du vent et stabilité de l'atmosphère. Vous pourrez faire varier également les choix de

paramètres du modèle tels que les classes de stabilité utilisées, la prise en compte de la sur-hauteur, etc (voir cours IE1). Vous pourrez également aborder le problème grâce aux calculs statistiques avec une rose des vents ou avec une base de données météo (fichiers fournis par les encadrants).

- a) Établissez un plan d'expérience décrivant de façon synthétique les simulations à lancer.
- b) Lancez les simulations en sauvegardant les figures et fichiers-texte voulus (voir annexe D).
- c) Tracez les graphes supplémentaires si nécessaire.
- d) Analysez chaque situation puis concluez sur l'impact de l'incinérateur.

Remarque : vous n'oublierez pas de prendre en compte à la fois les résultats des simulations et le niveau de fond pour obtenir les concentrations des polluants qui vous intéressent.

4 Rapport

Vous devez rendre à la fin de la dernière séance de TP un rapport de 4 à 5 pages de texte, plus les figures nécessaires. N'oubliez pas que le plan doit inclure, sous une forme ou une autre, une introduction permettant de comprendre le sujet traité, un plan d'expérience permettant de suivre votre démarche scientifique, des figures claires, correctement légendées et exploitées dans le texte. En conclusion, l'étude d'impact doit répondre à la question : **Quelle est la concentration atteinte au niveau du(des) lieu(x) étudié(s) dans le cadre de cette étude d'impact ? Est-elle inférieure aux normes ?** Votre rapport doit donc contenir, en plus de la réponse à cette question, tous les éléments nécessaires pour comprendre comment celle-ci a été obtenue et le degré de fiabilité associé.

A Classifications de la stabilité



La classification de Pasquill

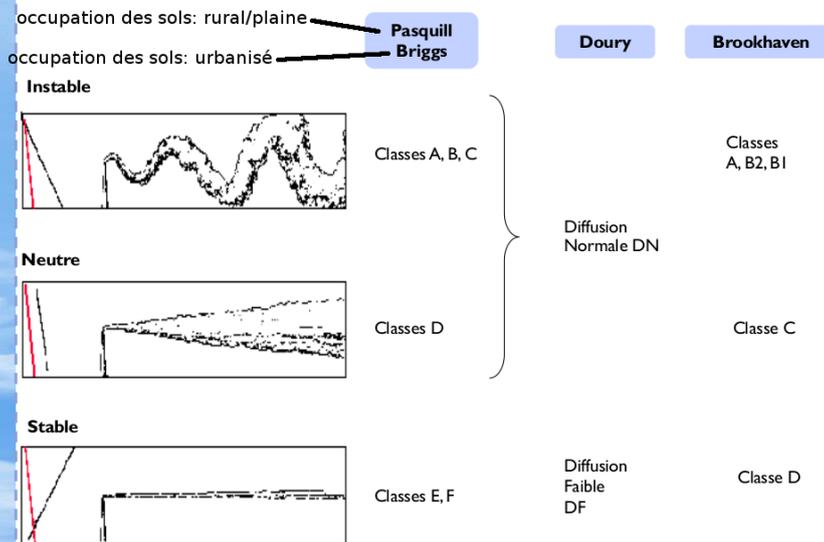
Une estimation de la turbulence : **les classes de Pasquill.**

La turbulence atmosphérique est répertoriée en 6 classes selon Pasquill appelées classes de stabilité atmosphérique :

- ❑ **Atmosphère instable (classes A, B et C)** : Dans de telles situations, la **dispersion** des polluants est **facilitée**. Ces situations apparaissent par fort réchauffement du sol. Elles se retrouvent principalement le jour en absence de vent fort.
- ❑ **Atmosphère neutre (classe D)** : Ces situations permettent la **bonne dispersion des polluants**. Elles correspondent aux situations de vents modérés ou à des situations de ciel couvert. Il s'agit de la situation la plus fréquente en zone tempérée.
- ❑ **Atmosphère stable (classes E et F)** : De telles situations **freinent le déplacement** des masses d'air. Elles sont induites par des **inversions thermiques** près du sol, ce qui limite la dispersion des polluants. Ces situations se retrouvent principalement la nuit par vent faible.



Classifications de la stabilité atmosphérique



B Données disponibles sur l'incinérateur de Thiverval-Grignon (78) ou équivalent

Mis en service 1975.

Capacité actuelle de traitement : 2 cheminées à 10,1 t de déchets incinérées par heure et une cheminée à 14,7 t/h. Les trois cheminées fonctionnent environ 7500 h/an.

Rejets de 5800 m³ de gaz brûlés par tonne de déchets incinérée.

Vitesse des gaz à l'émission > 12m/s.

Émissions connues pour chacune des trois cheminées (une ligne par cheminée) :

Thiverval-Grignon	mg/m ³	kg/an	Capacité (t/h)
Cd+Hg	0.067	29.5	10.1
	0.054	24	10.1
	0.029	18.5	14.7
Ni+As	0.02	9	10.1
	0.046	20	10.1
	0.011	7	14.7
Pb+Cr+Cu+Mn	0.219	96	10.1
	0.154	67.5	10.1
	0.036	23	14.7

Émissions connues totales pour les trois cheminées :

- Poussières : 4.8 mg/m³
- Dioxine+Furanes : 1.72 mg/j

C Rejets maximum autorisés pour différents composés.

Annexe à l'arrêté du 20/09/2002 transposant la directive européenne du 4/12/2002 relative aux installations d'incinération. Rejets maximum autorisés pour différents composés.

Paramètre	Valeur en moyenne journalière (mg/m ³)	Valeur en moyenne sur une demi-heure (mg/m ³)
Poussières totales	10	30
Substances organiques à l'état de gaz ou de vapeur exprimées en carbone organique total (C.O.T)	10	20
Chlorure d'hydrogène (HCl)	10	60
Fluorure d'hydrogène (HF)	1	4
Dioxyde de soufre (SO ₂)	50	200
Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO ₂) exprimés en dioxyde d'azote pour les installations existantes dont la capacité nominale est supérieure à six tonnes par heure ou pour les nouvelles installations d'incinération	200	400
Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO ₂) exprimés en dioxyde d'azote pour les installations d'incinération existantes dont la capacité nominale est inférieure ou égale à six tonnes par heure	400	/

Paramètre	Valeur
Cadmium et ses composés, exprimés en cadmium (Cd) + thallium et ses composés, exprimés en thallium (Tl)	0,05 mg/m ³
Mercure et ses composés, exprimés en mercure (Hg)	0,05 mg/m ³
Total des autres métaux lourds (Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V)	0,5 mg/m ³
Paramètre	Valeur
Dioxines et furannes	0,1 ng/m ³

D Informations pratiques

- Le projet est forcément enregistré en local, probablement dans C :/, puis dans le répertoire du logiciel : ARIA/IMPACT1.8/PROJECT/lenomduprojet/.
- La documentation du code, très bien faite, est disponible dans le répertoire C :/ARIA/IMPACT1.8/DOC (pdf en français disponible).
- Pour enregistrer la carte de concentrations au sol : une fois le choix de l'échelle de couleurs satisfaisant, dans le menu Sorties, choisir Export GIF puis les cas voulus (attention, les variables issues du calcul académique sont précédées d'un A_, celles issues du calcul avec une rose des vents d'un R_) et on peut alors choisir un nom et l'endroit où les fichiers seront créés. Assurez-vous d'avoir un répertoire par simulation avec un nom explicite.
- Le fichier qui résume tout ce qui a été pris en compte pour la simulation est le fichier .LIS (dans C :/ARIA/IMPACT1.8/PROJECT/lenomduprojet/). Pour l'enregistrer, dans le menu Sorties, choisir Listing puis Exporter. Pensez donc à le sauver sous un nom explicite à chaque simulation, par exemple avec les figures correspondant.
- Pour obtenir les résultats sous l'axe du panache, dans le menu Sorties, choisir Résultats sous l'axe puis Exporter. Un fichier texte .axe est créé à l'endroit choisi, par exemple avec les figures correspondant.