

Introduction

Depuis 25 ans environ, les sciences cognitives constituent un nouveau secteur rassemblant de nombreuses disciplines. On y retrouve diverses disciplines complémentaires en ne citant que de la philosophie à l'intelligence artificielle en passant par les sciences exactes, la psychologie, la linguistique, la philosophie, l'anthropologie et les neurosciences etc. Ces diverses disciplines sont regroupées autour d'un même projet, l'étude de l'activité de connaissance sous toutes ses formes : perception, mémoire, langage, apprentissage, résolution de problèmes, conceptualisation (pensée), planification de comportements passionnels, gestion des émotions, action.

Les sciences cognitives visent à étudier l'activité de la connaissance à partir de "machines à penser", c'est-à-dire la robotique, qui sont appelées à collaborer avec l'intelligence humaine pour résoudre des problèmes complexes ne pouvant l'être par une discipline isolée. Sous cet angle, l'ordinateur joue un rôle majeur car même s'il est trop différent du cerveau pour lui être comparé, il n'en reste pas moins que les principes de son fonctionnement rendent possible la mise au point de modèles explicatifs des nombreuses capacités humaines qu'ils permettent, de plus, de prolonger et d'amplifier (cybernétique).[1]

Faisant référence à la revue de la littérature scientifique, en 1960, George Miller et Jérôme Bruner ont créé à l'université de Harvard aux États-Unis le premier centre en sciences cognitives. L'objectif poursuivi était l'étude des mécanismes mentaux, notamment ceux impliqués dans l'utilisation du langage. Ces deux psychologues considéraient la connaissance comme la manipulation de symboles et percevaient l'ordinateur comme un bon modèle de l'esprit humain. Ils cherchaient à introduire davantage de rigueur formelle dans les sciences sociales en utilisant l'informatique et des éléments de logique. Les ouvrages consacrés aux sciences cognitives se sont développés au milieu des années quatre-vingts. En 1985, une histoire de la révolution cognitive, illustrant que les sciences cognitives tournent autour de deux axes principaux : la psychologie et l'informatique, a été publié par le célèbre psychologue Howard Gardner.[2]

Jerry Fodor, psychologue cognitiviste, décrit en 1975 dans son ouvrage intitulé "le langage de la pensée" qu'un état mental étant caractérisé par une relation qu'entretient l'esprit avec une certaine proposition exprimée dans un langage formel, le "mentalais".[3]

En 1983, il propose sa théorie de la modularité qui postule que l'esprit humain est constitué de modules destinés à traiter, de façon automatique, un type très limité d'information.[4] Il assimile donc les facultés cognitives à des modules de traitement de l'information. Fodor schématise la pensée comme un automate traitant des "entrées" (input) et produisant des "sorties" (output) ; l'état interne du système correspondrait à nos états mentaux et nos représentations mentales. Cette théorie computationnelle de l'esprit consi-

dère les individus comme des systèmes traitant de l'information.

Quant aux problèmes liés à la pollution de l'air et plus particulièrement, la dispersion des polluants atmosphériques, qui est actuellement devenue une préoccupation primordiale des décideurs, les disciplines des sciences cognitives telles que la physique, les mathématiques, la programmation et la simulation informatiques entrent en jeu dans le cadre de modélisation numérique.

En d'autres termes, l'expertise technique, scientifique et cognitive a joué (et continue à jouer) un rôle crucial dans le domaine de la pollution atmosphérique. Ceci comprend historiquement à la fois : la compréhension des phénomènes en jeu et la définition de moyens de mesures appropriés que ce soit pour aider l'application de mesures réglementaires (les réseaux de surveillance de la qualité de l'air par exemple) ou pour affiner la connaissance scientifique (l'observation de la Terre et de la composition chimique par les satellites). Aux côtés de ces composantes classiques de l'expertise, la modélisation numérique est devenue un outil central pour l'évaluation de la pollution atmosphérique. L'utilisation des modèles recoupe en réalité de nombreux aspects[5] :

- la compréhension des processus (on est ici au niveau du travail scientifique).
- la prévision environnementale, à l'instar de la météorologie : comment prévoir un épisode de pollution photochimique ? comment estimer la dispersion d'un rejet accidentel ? etc.
- les études d'impact : comment estimer l'impact de scénarii de réduction d'émission sur la qualité de l'air, que ce soit au niveau européen par exemple (plafonnement d'émission par pays et par secteur économique) ou bien au niveau local (impact d'un Plan de Déplacement Urbain) ?
- les études climatiques sur le devenir de la composition chimique de l'atmosphère et les couplages avec l'effet de serre additionnel et le changement climatique.
- la modélisation inverse des flux d'émission (comment estimer à partir de mesures de concentrations dans l'air des émissions mal connues, éventuellement réglementées ?).

Toutes ces observations nous permettent donc de poser la problématique suivante : **"Dans quelle mesure la démarche cognitive contribuera-t-elle à la modélisation de la dispersion de polluants atmosphériques ?"** Le présent mémoire intitulé **"MODÉLISATION COGNITIVE : APPLICATION AU DÉVELOPPEMENT DE PROGRAMME DE SIMULATION DE PROCESSUS D'ADVECTION-DIFFUSION 2D PAR LA MÉTHODE DES VOLUMES FINIS EN VUE DE CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION DE LA DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE"** , propose une piste de réponses à cette interrogation. Pour y parvenir, nous avons réparti le travail en quatre chapitres. Dans le chapitre 1, nous présentons un état des connaissances sur la pollution atmosphérique et la modélisation. Le chapitre 2 est consacré à la formulation de l'équation d'advection-diffusion. On y présente également les méthodes de la modélisation de la pollution atmosphériques. Notre contribution per-

sonnelle, axée sur l'approche par volumes finis du problème d'advection-diffusion plan, et par la conception d'organigrammes de résolution fera l'objet du chapitre 3. Trois organigrammes y seront présentés : l'organigramme pour l'advection pure, organigramme relatif à la diffusion pure et enfin l'organigramme traitant la combinaison advection-diffusion. Quant au quatrième et dernier chapitre, il est réservé aux applications et aux simulations. Nous avons choisi le langage de programmation R, non seulement pour l'écriture en codes de notre programme mais également pour le traitement des données pour la visualisation graphique.

Chapitre 1

La pollution atmosphérique et sa modélisation

Dans ce premier chapitre, notre objectif est de faire une analyse bibliographique sur la problématique de modélisation de la pollution atmosphérique. Pour une meilleure mise en situation, nous nous sommes référés aux divers ouvrages et articles y afférents et ce dans le but de répondre aux questions suivantes : quelles sont les études déjà menées et quels résultats obtenus ? Quelles perspectives nécessitant des chercheurs relèves ont été avancées ? Maîtrisons-nous l'approche récente de résolution tout en tenant compte l'historique du problème ? Pour répondre à ces questions, les deux sections qui suivent sont les fruits de notre travail de recherche.

1.1 Pollution atmosphérique

1.1.1 Définition et classes de polluants

La pollution de l'air ou pollution atmosphérique est une altération de la qualité de l'air caractérisée par des mesures de polluants physiques, chimiques ou biologiques présents dans l'air atmosphérique, et qui ont des conséquences préjudiciables à la santé humaine, aux êtres vivants, au climat, voire aux biens matériels.

Un polluant est un corps d'origine anthropique ou non, à l'état solide, liquide ou gazeux, contenu dans l'atmosphère et qui ne fait pas partie de la composition normale de l'air ou qui y est présent en quantité anormale. Les principaux polluants atmosphériques se classent dans deux grandes familles bien distinctes : les polluants primaires (SO_2 , PS , NO_x , COV , CO) et les polluants secondaires (O_3). Les polluants primaires sont directement issus des sources de pollution alors que les polluants secondaires résultent des phénomènes de dispersion et de transformations photochimiques dans l'environnement. En hiver, la pollution atmosphérique est essentiellement due aux polluants primaires. En été, elle est beaucoup plus intense avec un mélange de polluants, différent de celui d'hiver. Les polluants secondaires dits photo-oxydants se forment par action du rayonnement solaire sur les polluants précurseurs que sont principalement le dioxyde d'azote (NO_2) et les composés organiques volatils (COV). Les polluants primaires et secondaires sont plus ou moins nuisibles à la santé humaine, selon leur concentration dans l'air, et à la sensibilité de l'individu.

1.1.2 Origine, principaux types et effets

[6] La pollution atmosphérique n'est pas un phénomène récent. Son origine remonte à l'invention du feu : depuis toujours le chauffage au bois et au charbon est une source majeure de la pollution de l'air dans les espaces confinés. Cette pollution n'a cessé d'évoluer avec les progrès réalisés au cours de l'histoire et dès l'Antiquité, le développement de la métallurgie a conduit à des émissions de plomb dont des traces ont été retrouvées dans les calottes glaciaires (Hong et al. 1994). Toutefois, ce n'est que depuis la révolution industrielle du 19^{ième} siècle que l'industrialisation et l'urbanisation à outrance, accompagnées d'émissions non contrôlées de polluants gazeux et particulaires dans l'atmosphère, ont eu des répercussions préoccupantes sur la santé, l'environnement et le climat.

Suivant un critère de toxicité, de spécificité de sources et de la pollution générée, les principaux polluants mesurés par les organismes de surveillance de la qualité de l'air sont les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), les particules en suspension (PS), le plomb (Pb), les composés organiques volatils (COV) et l'ozone (O_3).

Majoritairement, les impacts de la pollution se font ressentir dans les zones urbanisées et industrialisées. Ainsi dans le domaine de la santé, dès les années 30-50, les populations prennent conscience des effets nocifs de la pollution : en 1930 dans la vallée de la Meuse, puis en 1952, 1956 et 1957 à Londres, l'augmentation brutale des concentrations de dioxyde de soufre et de particules atmosphériques liée à des conditions météorologiques stagnantes et à l'utilisation effrénée des combustibles fossiles est à l'origine d'un fort excès de mortalité (plus de 4000 décès en 1952, Brimblecombe (1987)).

Sur le plan environnemental, les premiers épisodes de pollutions photochimiques apparaissent vers les années 50 à Los Angeles (Haagen-Smit 1952 ; Haagen-Smit and Fox 1956) : en présence d'un fort ensoleillement, les émissions d'oxydes d'azote et de composés organiques volatiles générées essentiellement par le trafic automobile conduisent à la formation de polluants

secondaires tels que l'ozone.

Dans le domaine climatique et au cours des années 80, la pollution atmosphérique devient également une préoccupation à l'échelle régionale avec la reconnaissance de son impact sur les écosystèmes forestiers et les eaux de surface. L'acidification des pluies (pluies acides) liée à l'oxydation des polluants gazeux dans l'atmosphère tels que le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote sont responsables de l'acidification des lacs et le dépérissement des forêts en Europe et en Amérique du Nord.

Même si des efforts importants en matière de réductions des émissions industrielles ont été réalisés depuis en Europe et aux Etats-Unis, permettant de limiter considérablement les rejets de polluants gazeux (tels que le dioxyde de soufre), les problèmes de pollutions restent toujours d'actualité, notamment avec la découverte récente des dangers sanitaires liés aux fines particules et aux métaux lourds. D'autre part, la pollution photochimique se régionalise, avec l'apparition d'épisodes extrêmes, comme celui qui a touché l'Europe en été 2003 en raison de conditions climatiques et de températures exceptionnelles.

1.2 Modélisation

1.2.1 Définitions

La modélisation est l'art ou la science, selon le point de vue, de représenter ou de transformer une réalité physique en des modèles abstraits accessibles à l'analyse et au calcul. C'est une approche de cognition, de construction et de projection qui relie la théorie et l'expérience.[7]

Un modèle est une représentation simplifiée ou une interprétation d'un système ou de phénomène physique permettant de reproduire son fonctionnement, de l'analyser, l'expliquer et d'en prédire certains aspects. Le principe de base est de remplacer un système complexe en un objet ou un opérateur simple reproduisant les aspects ou comportement principaux de l'original.

1.2.2 Types de modèles

D'une manière générale, on recense trois types de modèles : les modèles conceptuels, les modèles statistiques et les modèles déterministes. Le premier type sur lequel reposent les deux autres, statistiques et déterministes, consiste à énoncer d'une manière qualitative les phénomènes physico-chimiques qui sont les plus importants pour définir le processus étudié. Quant aux modèles statistiques, le principe de base est de relier différentes variables et les processus reliant ces variables sont représentés de manière implicite dans des équations statistiques. Comme intérêts, les modèles statistiques se fondent sur des mesures et sont ancrés dans la réalité. Par contre, ces modèles ne sont pas adaptés pour prédire des évolutions futures si les relations ne sont pas linéaires. Enfin les modèles déterministes visent à la formulation mathématique des phénomènes qualitativement identifiés dans le modèle conceptuel.[8]

1.2.3 Utilisation de modèles

Nous utilisons des modèles pour comprendre le phénomène et le représenter d'une manière compréhensible. Les modèles de dispersion atmosphérique, autour desquels tourne la problématique du présent mémoire, sont des modèles physiques et numériques issus de l'équation d'advection-diffusion. Ils sont utilisés pour évaluer les impacts des sources de pollution atmosphérique, concevoir des réseaux d'échantillonnage, calculer des concentrations dans l'air ambiant, etc. Brièvement, ils permettent ainsi d'orienter les décisions et d'améliorer les processus de conception.

1.2.4 Simulation informatique

La simulation informatique ou numérique désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe (par exemple : une simulation informatique, sur une étendue de 48 heures, de l'évolution du typhon Mawar produite par le Modèle météorologique WRF). C'est donc le processus d'adaptation aux moyens numériques de la modélisation théorique permettant de calculer sur ordinateur les solutions des modèles, et qui sert à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

1.3 Modélisation de la dispersion atmosphérique

1.3.1 Principe de base

La modélisation de la dispersion atmosphérique est une technique couramment utilisée pour mener des études d'impacts. Cette approche repose sur un principe de base bien défini qui demande aux modélisateurs certaines connaissances multidisciplinaires (mathématique, physico-chimique, informatique et surtout géophysique externe, c'est-à-dire la météorologie).

1.3.2 Eléments de météorologie

Les phénomènes météorologiques constituent le vecteur des polluants transportés dans l'atmosphère. Pour comprendre et modéliser la dispersion atmosphérique, il est donc essentiel de décrire les principaux phénomènes météorologiques, en particulier à l'échelle locale (inférieure à 10km).

— Structure verticale de l'atmosphère

Les variations verticales de la température permettent de diviser l'atmosphère en couches : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère. La **troposphère** est la plus basse couche de l'atmosphère où règne une couche d'air instable et turbulente. C'est dans cette couche où la température de l'air décroît continuellement à raison d'environ $6,5^{\circ}$ C par kilomètre que se produisent la plupart des phénomènes météorologiques.

La **stratosphère** est déjà une couche de faible densité. La température y reste constante jusqu'à environ 25km puis croît jusqu'aux environs de 0° C autour de 40km d'altitude. La température s'y élève rapidement avec l'altitude, conséquence de l'absorption du rayonnement solaire de courte longueur d'onde par la couche d'ozone. La stratosphère est brassée aux moyennes latitudes par de puissants courants atmosphériques qui circulent d'Ouest en Est : les courants jets (jet-streams) à des vitesses pouvant atteindre les 500 km/h.

La **mésosphère** est la zone de l'atmosphère où la température décroît considérablement jusqu'à environ 80 km d'altitude, limite de cette couche. Quant à la **thermosphère**, la température y croît fortement jusqu'à 500° C à la limite de l'atmosphère. La dernière couche de l'atmosphère terrestre au-dessus de la thermosphère et où évoluent en orbite les satellites s'appelle **exosphère**. [9],[10]

La figure qui suit illustre la structure verticale de l'atmosphère.

— Le vent

En météorologie, le vent désigne le mouvement horizontal de l'air. Sa mesure comprend deux paramètres, sa direction exprimée en fonction de la rose des vents et sa vitesse ou force exprimée en m/s (ou km/h ou noeud). Comme l'air sous pression qui s'échappe d'un pneu ou d'un ballon gonflé, l'air s'écoule dans l'atmosphère des zones de haute pression (anticyclones) vers les zones de basse pression (dépressions). C'est donc le gradient horizontal de pression qui est à l'origine du vent. Le vecteur vitesse du vent est la première variable à considérer dans l'étude de la dispersion atmosphérique. L'évolution spatio-temporelle de la vitesse est régie par l'équation de Navier-Stokes.

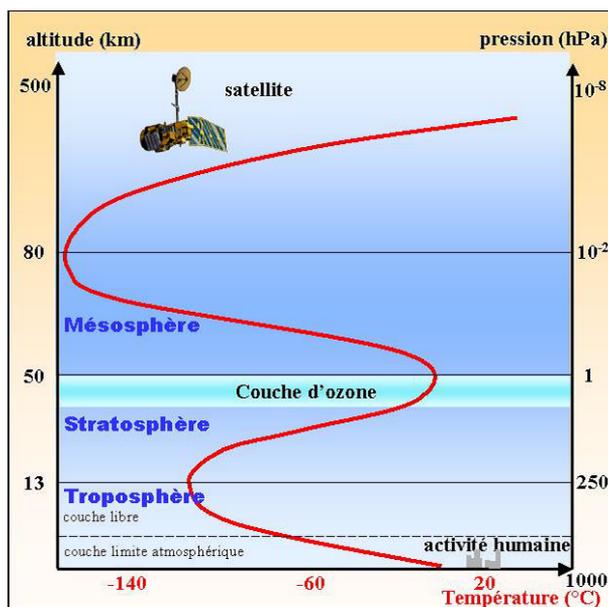


FIGURE 1.1 – Structure verticale de l'atmosphère.

— La pression atmosphérique

Le poids de l'air exerce à la surface de la Terre une force, c'est la pression atmosphérique. À moyenne et grande échelle (supérieures à 10km), il est souvent possible de négliger les mouvements verticaux de l'air devant les mouvements horizontaux. Les variations verticales de la pression sont caractérisées par l'équilibre hydrostatique qui est marqué par la décroissance de la pression avec l'altitude. Aux échelles locales (inférieures à 10km), cet équilibre hydrostatique peut être perturbé par la présence de relief, de bâtiments ou par des effets de convection thermique. La détermination de la distribution de pression n'est alors possible qu'à l'aide de modèles numériques d'écoulement. La pression atmosphérique se mesure à l'aide d'un baromètre et s'exprime, souvent en sciences atmosphériques, en hectopascal.

— La température

Les écoulements atmosphériques ne sont pas isothermes. En effet, le moteur principal de ces écoulements est l'apport d'énergie par le rayonnement solaire. Le rayonnement chauffe la surface terrestre qui transmet sa chaleur à l'atmosphère par convection. Cela induit des différences de température et donc de densité entre les différentes zones de l'atmosphère. Sous l'effet de la gravité et de la poussée d'Archimède, il en résulte des mouvements de convection qui, à plus grande échelle, s'organisent en structures cycloniques ou anticycloniques et forment les vents météorologiques. La température est donc une variable essentielle dans l'étude du mouvement atmosphérique. En moyenne, cette température décroît verticalement sur toute la hauteur de la troposphère, à raison d'environ $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$. L'évolution verticale de la température de l'air détermine l'état de stabilité thermique de l'atmosphère.

— **Stabilité de l'atmosphère**

Une atmosphère est **stable** si une masse d'air, écartée de sa position d'équilibre, a tendance à revenir. Elle est **instable** dans le cas contraire. Ces déplacements d'air sont guidés par des lois thermodynamiques. Si la masse d'air soulevée est plus froide que le milieu environnant, elle sera plus dense et donc redescendra à son niveau de départ (atmosphère stable). Si la masse d'air soulevée est plus chaude que le milieu environnant, elle sera plus légère et subira donc une élévation (atmosphère instable). Ainsi la stabilité d'une masse d'air dépend de sa température de l'élévation, relative à la température de l'air environnant stationnaire qu'elle traverse. La structure thermique verticale de la troposphère tient alors une part importante dans le mélange verticale des masses d'air, et par conséquent la dilution des polluants.