Université de Montréal

PHY 2100 – Physique environnementale

Sedimentation des cendres de feux de foret

par :
Timothé Payette
20239892

29 avril 2024

Introduction

Les feux de forêts ont fait plusieurs ravages au Canada, comme dans le reste du monde, ces dernières années. Leurs cendres peuvent être projetées à plusieurs kilomètres dans les airs et retomber jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres plus loin des feux. Certaines cendres ont même réussi à traverser l'océan Atlantique pour se rendre jusqu'en Europe. Le but de ce projet est de calculer la distance parcourue par les particules durant un feu de forêt selon leur diamètre et la hauteur à laquelle elles ont été projetées. Le travail va être séparé en deux parties : le calcul de la vitesse des particules à certaines hauteurs et le calcul de la distance parcourue en utilisant les équations de sédimentation.

1 Vitesse des particules

Deux forces principales ont un effet sur la vitesse horizontale des particules : le vent et la poussée de l'air chauffé par le feu.

1.1 Calcul du vent selon les hauteurs

La principale raison de la différence de vitesse du vent selon la hauteur est la viscosité de l'air. En effet, lorsqu'un fluide, dans ce cas l'air, s'écoule sur une surface, il crée une force de friction qui le ralentit. Toutes les couches au-dessus sont donc ralenties elles aussi, mais avec de moins en moins de force. Ceci crée une couche de ralentissement visqueuse qui augmente suivant la forme d'une courbe $f(x) = \sqrt{x}$. L'équation qui décrit cette courbe est :

$$\Delta(x) = \sqrt{\frac{\nu x}{u_0}} \tag{1}$$

Dans le cas de ce projet, je vais tenir compte du fait que le sol est plutôt plat. Donc, je peux utiliser l'équation :

$$V = V_0 \left(\frac{\ln\left(\frac{h_2}{\nu}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{\nu}\right)} \right) \tag{2}$$

V_0 est la vitesse du vent de référence, qui est la plus basse au sol. h_1 et h_2 sont respectivement la hauteur de la vitesse de référence et la hauteur à laquelle on veut connaître la vitesse, et ν est la constante de viscosité de l'air.

Hauteur (m)	**Vitesse du vent (m/s)**
250	13.40
500	15.17
750	16.20
1000	16.94
1250	17.51
1500	17.97
1750	18.36
2000	18.70
2250	19.00
2500	19.27
2750	19.52
3000	19.74

Table 1 – Vitesse du vents en fonction de la hauteur de 250m a 3000m

1.2 Calcule de la vitesse de pousser de l'air chaud

Le second effet sur la vitesse des particules est la poussée de l'air chaud verticalement due à l'expansion de l'air, lui donnant une densité plus faible, ce qui crée une poussée d'Archimède vers le haut. La dilatation est exprimée par cette équation :

$$\alpha = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial T} \tag{3}$$

Arrivée à une certaine hauteur, tout dépendant des conditions atmosphériques, les particules vont cesser de monter (dans le cas de ce projet, la hauteur maximale sera de 3000 m) car la température aura assez diminué, ou la pression atmosphérique autour des particules sera devenue trop basse pour créer une poussée.

Pour calculer la vitesse de montée des particules de cendres, il faut utiliser *l'approximation de Boussinesq*, qui est une simplification des équations de Navier-Stokes et consiste en ces trois équations.

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{4}$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\nabla\left(\frac{p}{\rho} + \Phi\right) + \nu\nabla^2 u - \alpha g \Delta T \tag{5}$$

$$\frac{D(T + \Delta T)}{Dt} = \kappa \nabla^2 (T + \Delta T) \tag{6}$$

Pour trouver la vitesse, je vais prendre l'équation (5) en considérant une composition atmosphérique constante ; on peut alors ne considérer que le dernier terme, tel que :

$$\frac{Du}{Dt} = -\alpha g \Delta T$$

$$\frac{u_0^2}{L} = \alpha g \Delta T$$

$$u_0 = \sqrt{\alpha g \Delta T L} \tag{7}$$

En utilisant $\alpha = 0.00094$ (trouvé sur le site web *The Engineering ToolBox*), g = 9.81 m/s, $\Delta T = 800$ et L = 500m. Nous arrivons à une vitesse de poussée $u_0 \approx 60 m/s$ ce qui est dans les moyennes normales de vitesse des feux de foret. Pour ce project, la vittesse vertical est ajoutée à la vittesse horizontal des particules pas l'entremise d'un ration d'amplification(qui peut être vu dans le code)

Hauteur (m)	Vitesse des particules (m/s)
250	13.66
500	15.46
750	16.52
1000	17.26
1250	17.84
1500	18.32
1750	18.72
2000	19.06
2250	19.37
2500	19.64
2750	19.89
3000	19.12

TABLE 2 – Vitesse des particule en fonction du vents et de la convection

2 Sedimentation des particules

La sédimentation des particules sera trouvée de la même manière que lorsque nous avons fait l'exemple des deux mètres en classe et sera calculée pour quatre tailles de particules [5, 10, 15, 20] microns. Tout d'abord, nous commençons avec la seconde loi de Newton $F = ma$, en tenant compte qu'il y a une vitesse constante, que nous avons calculée plus haut, qui pousse les particules en aval.

$$F_D = -6\pi\rho_f\nu R(u - u_v e_x) \tag{8}$$

En integrans deux fois l'accelération nous obtenons la position.

$$x(t) = u_v t + \frac{m}{6\pi\mu R}(u_0 - u_v)(1 - e^{-\frac{6\pi\mu R}{m}t}) + x_0 \tag{9}$$

Pour obtenir le temps t à insérer dans l'équation, il faut calculer la vitesse terminale de chaque particule afin de déterminer combien de temps elles resteront en l'air. Cette vitesse terminale est calculée avec l'équation suivante :

$$u_0 = \frac{2gR^2}{9\nu}\left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1\right) \tag{10}$$

Pour ce projet, j'ai écrit un code Python qui effectue une boucle sur les quatre tailles de particules, avec les douze possibilités de hauteur et leur vitesse respective. Ce code produit les tableaux suivants.

Particules de 5 µm

Hauteur (m)	Distance (km)
250	494.04
500	1118.28
750	1792.43
1000	2496.96
1250	3226.08
1500	3975.45
1750	4739.30
2000	5514.71
2250	6304.96
2500	7103.16
2750	7912.93
3000	8732.11

Particules de 10 µm

Hauteur (m)	Distance (km)
250	123.51
500	279.57
750	448.11
1000	624.24
1250	806.52
1500	993.86
1750	1184.82
2000	1378.68
2250	1576.24
2500	1775.79
2750	1978.23
3000	2183.03

Particules de 15 µm

Hauteur (m)	Distance (km)
250	54.89
500	124.25
750	199.16
1000	277.44
1250	358.45
1500	441.72
1750	526.59
2000	612.75
2250	700.55
2500	789.24
2750	879.21
3000	970.23

Particules de 20 µm

Hauteur (m)	Distance (km)
250	30.88
500	69.89
750	112.03
1000	156.06
1250	201.63
1500	248.47
1750	296.21
2000	344.67
2250	394.06
2500	443.95
2750	494.56
3000	545.76

Comme nous pouvons le voir dans ces quatre tableaux, la hauteur et la taille des particules ont un grand effet sur la distance parcourue. Par exemple, les particules de 5 µm peuvent parcourir plus de 8000 km avant de retomber, ce qui leur permettrait de traverser l'océan Atlantique. Cependant, ces plus petites particules risquent de condenser des molécules d'eau dans les nuages et de retomber avec la pluie, un phénomène que je ne prends pas en compte dans mon projet. À l'autre extrémité du spectre, les grosses particules de 20 µm retombent à environ 545 km lorsqu'elles montent à la même hauteur. Cela montre très bien l'effet que la taille de la particule a sur son mouvement.

3 Approximation

Pour faciliter la réussite de ce projet, j'ai dû faire plusieurs approximations qui peuvent avoir modifié les résultats. Donc, pour obtenir de meilleurs résultats, il faudrait prendre en compte plusieurs autres variables omises dans ce travail.

4 Sources

— METEOTEST, christoph.schilter@meteotest.ch. (n.d.). *Windenergie-Daten der Schweiz*. Copyright 2007 wind-data.ch. All Rights Reserved. https://www.wind-data.ch/tools/profile.php?h=10&v=5&z0=0.1&abfrage=Actualiser

— *Density of Ashes, dry in 285 units of density*. (n.d.). Aqua-Calc. https://www.aqua-calc.com/page/density-table/substance/ashes-coma-and-blank-dry

— A. P. (2024, January 26). *Analysis of wildfire and structure fire combustion residues*. The Synergist. https://synergist.aiha.org/202208-fire-combustion-residues

— Editor Engineeringtoolbox. (2024, April 18). *Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient vs. Temperature and Pressure*. https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-w
600.html

— *Processus physiques II. matière*. (n.d.-b). Phy2100. https://www.astro.umontreal.ca/~paulchar/phy2100/notessupp/PHY2100_Chap5.pdf