



**HAL**  
open science

## Suivi Lagrangien 3D de particules à haute résolution spatiale et temporelle en écoulement

Mickaël Bourgoïn, Nicholas T Ouellette, Haitao Xu, Eberhard Bodenschatz

### ► To cite this version:

Mickaël Bourgoïn, Nicholas T Ouellette, Haitao Xu, Eberhard Bodenschatz. Suivi Lagrangien 3D de particules à haute résolution spatiale et temporelle en écoulement. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-00266113

**HAL Id: hal-00266113**

**<https://hal.science/hal-00266113v1>**

Submitted on 2 Sep 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Suivi Lagrangien 3D de particules à haute résolution spatiale et temporelle en écoulement pleinement turbulent

Mickaël Bourgoïn<sup>1</sup>, Nicholas Ouellette<sup>2</sup>, Haitao Xu<sup>2</sup>, Eberhard Bodenschatz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> L.E.G.I. - U.M.R. 5519 - C.N.R.S./I.N.P.G./U.J.F. ; BP53 - 38041 Grenoble cedex 09 - France

<sup>2</sup> Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization ; 37077 Göttingen, Germany  
mickael.bourgoïn@hmg.inpg.fr

### Résumé :

*Nous présentons un dispositif permettant le suivi Lagrangien optique 3D de particules, avec une grande résolution spatio-temporelle, pour l'étude d'écoulements pleinement turbulents. Le dispositif permet de reconstruire les trajectoires de plusieurs centaines de particules simultanément à l'aide de plusieurs caméras ultra-rapides sous différents angles de vision. Nous décrivons les solutions techniques et algorithmiques choisies, ainsi qu'un exemple d'application dans le cadre de l'étude de la dispersion turbulente.*

### Abstract :

*We present a high resolution 3D Lagrangian Tracking technique, designed to investigate highly turbulent flows. This technique uses several ultra high speed cameras at different view angles to track simultaneously several hundreds of particles with a high space and time resolution. We describe the adopted technical and software solutions as well as an applicative example in the context of turbulent dispersion.*

### Mots-clefs :

**Lagrangien ; turbulence ; dispersion**

## 1 Introduction

Dans une approche Lagrangienne en mécanique des fluides, on s'intéresse à décrire un écoulement à partir de la dynamique des particules de fluide que l'on suit dans le temps le long de leur trajectoire. Cette approche offre un cadre naturel pour la description de nombreux problèmes impliquant le transport et la dispersion turbulente. C'est la raison pour laquelle, le suivi Lagrangien de particules est devenu une technique de plus en plus employée pour l'étude expérimentale de la dynamique des fluides. Dans cette approche, il s'agit d'ensemencer un écoulement avec des traceurs dont le mouvement est enregistré de sorte à caractériser leur dynamique, en terme de déplacement, vitesse et accélération le long de leur trajectoire. Ces informations peuvent ensuite servir à déterminer les propriétés de l'écoulement lui-même. D'un point de vue expérimental, les mesures Lagrangiennes en turbulence développée sont difficiles à réaliser du fait de la nature multi-échelles du problème. Cette contrainte a longtemps rendu inaccessible toute mesure Lagrangienne directe. Ces mesures sont récemment devenues envisageables grâce aux développements en matière d'imagerie numérique et de puissance de calcul [1, 2, 3] ainsi que par la mise au point de techniques de suivi acoustique par diffusion Doppler [4, 5]. Un des enjeux concerne la possibilité de pouvoir suivre un grand nombre de particules simultanément, d'une part pour accélérer la convergence statistique de l'étude, mais également pour avoir accès à des grandeurs intrinsèquement multiparticulaires, telles que la dispersion relative de paires ou la déformation géométrique de tétrades, qui interviennent dans des modèles récents de turbulence [6]. Seuls les systèmes de suivi par imagerie optique, tel que celui décrit dans ce

document, sont bien adaptés aux cas multiparticulaires, les systèmes acoustiques ne permettant pas de différencier de façon fiable plus d'une ou deux particules à la fois.

Les systèmes optiques les mieux résolus de nos jours [7] permettent de suivre simultanément plusieurs centaines de particules et de reconstruire leurs trajectoires 3D avec plus de trois décades en résolution spatiale et temporelle effective. Ceci permet d'étudier des écoulements très turbulents, jusqu'à des nombres de Reynolds typiquement de l'ordre de  $10^5$ . Dans la deuxième partie de ce document nous décrivons le système que nous avons mis au point avant d'aborder dans la troisième partie les aspects logiciels liés aux algorithmes permettant de reconstruire les trajectoires Lagrangiennes. Enfin, dans la quatrième partie, nous donnons un exemple d'application montrant le fort potentiel de cette technique.

## 2 Le suivi Lagrangien optique 3D

Les écoulements turbulents sont caractérisés par la coexistence de structures sur une vaste plage d'échelles spatio-temporelles. Les plus grandes structures, qui sont également les plus lentes, évoluent à une échelle caractérisée par le mécanisme d'injection d'énergie dans l'écoulement (dans un mélangeur, elles seront par exemple reliées à la géométrie et à la dynamique du batteur). Nous noterons par la suite  $L$  et  $T$  les échelles spatiale et temporelle (respectivement) associées à ces grandes structures. L'image classique de la cascade d'énergie turbulente décrit ensuite le fractionnement de ces grandes structures en structures plus fines et plus rapides, et ainsi de suite jusqu'à atteindre des échelles suffisamment petites pour que toute l'énergie cinétique qu'elles contiennent soit dissipée par la viscosité moléculaire du fluide. Nous notons  $\eta$  et  $\tau_\eta$  les échelles dissipatives spatiale et temporelle (respectivement), associées aux plus petites structures de l'écoulement. La gamme d'échelles comprises entre  $L$  et  $\eta$  est appelée régime des échelles inertielles de la turbulence. On peut montrer que l'étendue du régime inertiel est relié au nombre de Reynolds  $Re$  de l'écoulement (qui caractérise l'intensité de la turbulence) par :

$$\frac{L}{\eta} \sim Re^{3/4} \quad \text{et} \quad \frac{T}{\tau_\eta} \sim Re^{1/2}. \quad (1)$$

Les écoulements pleinement turbulents, tels que ceux que l'on peut rencontrer dans l'atmosphère, les océans ou encore dans les procédés industriels, ainsi que les expériences modèles utilisées en laboratoire, atteignent typiquement des nombres de Reynolds de l'ordre de  $10^5$ - $10^6$ . Compte tenu des relations (1), les échelles inertielles couvre donc typiquement 3 à 4 décades de dynamique spatio-temporelle. Afin de caractériser pleinement la dynamique d'une particule de fluide dans un tel écoulement il faut donc être en mesure de disposer d'une technique d'imagerie à haute résolution spatiale et temporelle. De tels outils d'imagerie ne sont disponibles sur le marché que depuis quelques années, permettant des acquisitions d'images à une cadence de l'ordre de 10kHz. En matière de résolution spatiale, l'utilisation simultanée d'au moins trois, voire quatre, caméras s'avère nécessaire. En effet, les caméras disponibles ne permettent pour le moment d'atteindre des cadences de 10kHz qu'en restreignant la zone sensible du capteur typiquement à  $256 \times 256$  pixels, ce qui ne donne guère qu'un peu plus de 2 décades de dynamique spatiale. Toutefois la combinaison de trois caméras apporte suffisamment de redondance d'information pour atteindre une résolution spatiale effective de l'ordre d'un dixième de pixel [1]. Trois capteurs individuels de  $256 \times 256$  pixels, correctement combinés, permettent ainsi d'atteindre une résolution spatiale effective de l'ordre de  $2560 \times 2560$  pixels, soit plus de 3 décades de résolution dynamique. L'utilisation de plusieurs caméras à des angles de vue différents permet également d'avoir accès à la position 3D des particules par stéréoscopie.

La figure 1a illustre un exemple de configuration expérimentale que nous avons utilisée, combinant 3 caméras rapides (des Phantom V7.2 de Vision Research Inc., équipées de capteurs

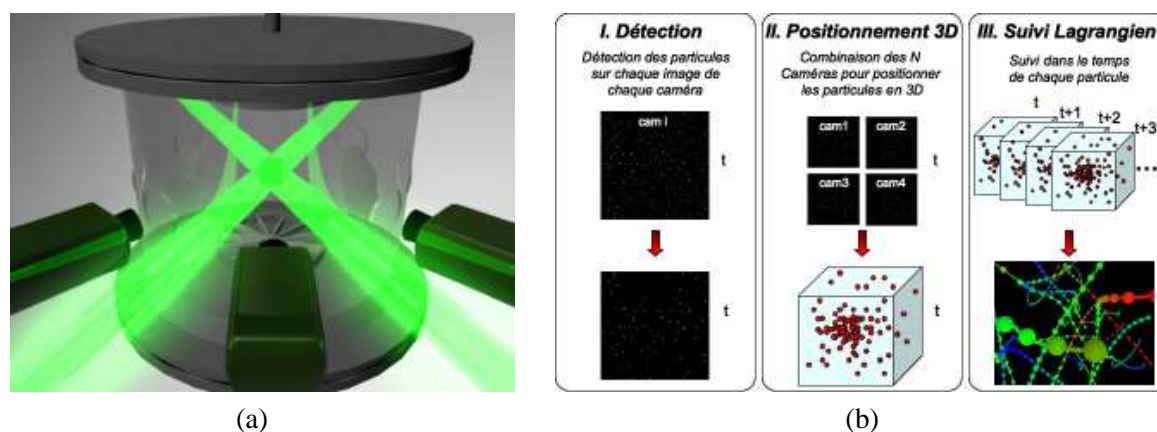


FIG. 1 – (a) Système de suivi Lagrangien optique utilisant 3 caméras ultra rapide. (b) Principe et étapes de l’algorithme de reconstruction des trajectoires 3D des particules.

CMOS, permettant d’acquérir à 37kHz des images sur 256x256 pixels pendant environ 2 secondes). À de telles cadences, le temps d’exposition par image devient très court, et l’utilisation d’une source lumineuse très puissante nécessaire. Dans la configuration représentée sur la figure 1a, par exemple, deux lasers YAG pulsés ont été élargis, synchronisés et combinés pour une puissance laser totale de 150 W dans le volume de mesure (à leur intersection).

Enfin, signalons que le taux de données numériques correspondant à la prise d’image à une cadence voisine de  $40 \cdot 10^3$  images par secondes depuis 3 caméras avoisine les 10 Go par seconde de mesure. Un centre de calcul puissant en terme de stockage et de traitement des signaux en lien direct et continu avec l’expérience est donc indispensable.

### 3 Reconstruction des trajectoires 3D

Une fois les images acquises, il s’agit de reconstruire les trajectoires 3D du plus grand nombre de particules possible. Cette opération comporte trois étapes (figure 1b) :

1. *Détection des particules* : chaque image (à chaque instant  $t$ ) de chaque caméra est analysée afin de détecter et de positionner le mieux possible le centre des particules imagées. À la fin de cette étape on récupère les cartes de la position 2D du centre des particules.
2. *Positionnement 3D* : la deuxième étape consiste à combiner, à chaque instant  $t$  donné, les images prises par les  $N$  caméras utilisées, pour reconstruire la position 3D du centre des particules avec la plus grande précision possible.
3. *Suivi Lagrangien* : enfin, une fois les positions 3D des particules retrouvées à tous les instants, les images successives permettent, à l’aide d’un algorithme de suivi adéquat, de reconnecter les trajectoires d’un instant à l’autre.

Nous détaillons brièvement à la suite ces différentes étapes.

#### 3.1 Détection des particules

Nous avons testé différents algorithmes pour le positionnement 2D des particules sur chacune des images. Le choix de l’algorithme final résulte d’un compromis entre temps de calcul et qualité de la détection. Cette dernière est quantifiée à la fois par la précision avec laquelle la position du centre des particules est déterminée et par le nombre de particules correctement détectées. La figure 2a représente un agrandissement de l’image typique de particules sur le

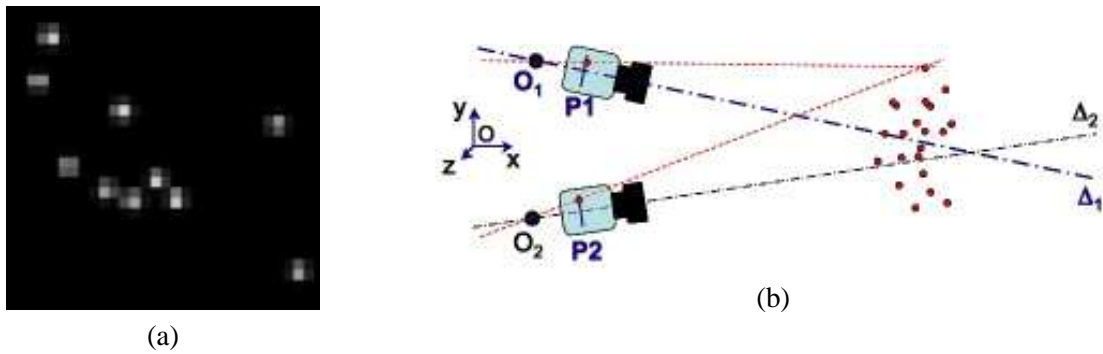


FIG. 2 – (a) Agrandissement de l’image de particules enregistrée par les caméras. Lorsque les particules utilisées sont de petite taille, leur image n’excède pas quelques pixels dans chaque direction. (b) Modèles de calibration des caméras et positionnement absolu 3D des particules.

capteur des caméras. La première étape consiste à identifier sur l’image les maxima locaux d’intensité, traduisant la présence d’une particule. Ensuite, l’image autour de chaque maximum local est analysée pour déterminer au mieux la position du centre de la particule. Comme le montre la figure 2a, pour de petites particules, leur image ne dépasse pas les quelques pixels. Dans ces conditions, des algorithmes simples tels que prendre le centre de masse d’intensité autour du maximum ne sont pas suffisamment précis. Des algorithmes en terme de réseaux de neurones [8] se sont avérés très précis, notamment lorsque les images sont très bruitées, mais relativement lents. L’algorithme finalement choisi, consiste à ajuster l’image d’une particule autour d’un maximum par deux profils gaussiens : un selon la verticale et l’autre selon l’horizontale. Les maxima des ajustements gaussiens donnant le centre de la particule. Le choix d’un ajustement par deux gaussiennes 1D plutôt qu’une seule gaussienne 2D vient du fait que la première option peut être inversée analytiquement et conduit à un algorithme plus rapide avec sensiblement la même précision qu’un vrai ajustement par une gaussienne 2D. L’algorithme choisi permet ainsi de retrouver environ 95% des particules sur une image comportant jusqu’à 300 particules typiquement et de positionner leur centre au dixième de pixel près.

### 3.2 Positionnement 3D

Alors que la détection des particules peut être faite dans l’espace image de chaque caméra, leur positionnement 3D et le suivi Lagrangien doivent être faits dans l’espace réel (commun à toutes les caméras). Afin de définir la transformation permettant pour chaque caméra de passer de l’espace image à l’espace réel, nous utilisons une méthode de calibration développée par Tsai [9]. Chaque caméra est représentée par un modèle de projection défini par un axe optique  $\Delta_i$ , un centre optique  $O_i$  et un plan de projection  $P_i$ . L’image d’une particule  $X$  par la caméra  $i$  est simplement donnée par l’intersection de la droite  $O_iX$  avec le plan  $P_i$  (figure 2b). Le modèle est défini par 9 paramètres par caméra : 6 paramètres externes définissent la position absolue de la caméra (3 coordonnées pour  $O_i$  et 3 angles pour  $\Delta_i$ ) et 3 paramètres internes (distance  $O_iP_i$ , aberrations géométriques, décalage éventuel de l’espacement horizontal et vertical des pixels du capteur). Les paramètres du modèle sont ajustés à partir des images d’un masque de calibration. Une fois chaque caméra calibrée, connaissant l’image d’une particule sur le plan de projection d’une caméra on peut définir une ligne de vue représentant le lieu possible des positions de la particule dans l’espace réel. L’intersection des lignes de vues de deux caméras permet enfin de définir la position absolue 3D de la particule. Comme nous l’avons déjà souligné notre dispositif n’utilise pas uniquement deux, mais trois, voire quatre caméras dans certaines configurations.

En pratique les lignes de vue issue de chaque caméra ne s'intersectent pas rigoureusement, et la position 3D de la particule en question est en réalité obtenue comme le point de l'espace minimisant la distance à chacune de ces lignes. À chaque fois qu'une caméra est rajoutée, la redondance d'information apportée définie de façon de plus en plus contrainte la position de la particule, ce qui améliore considérablement la résolution spatiale effective 3D du système. Ainsi, avec trois caméras au lieu de deux, la résolution effective atteinte est de l'ordre d'un dixième "équivalent pixel" (c'est-à-dire un dixième de la dimension de l'espace dont l'image fait la taille d'un pixel compte tenu du grossissement du système de projection). C'est ainsi que la combinaison de trois capteurs de 256x256 pixels fournit une résolution spatiale effective 3D de "2560x2560x2560" pixels. Rajouter une quatrième caméra, permet ensuite d'accroître le nombre de particules effectivement suivies. En effet, des situations ambiguës où une particule en cache une autre dans la ligne de visée d'une caméra peuvent se produire. Ces ambiguïtés peuvent être levées en rajoutant une quatrième caméra à un angle de vue différent, de sorte à maximiser le nombre de particules qui à tout instant sont vues par au moins trois caméras.

### 3.3 Suivi Lagrangien

Le suivi Lagrangien consiste à reconnecter les trajectoires des particules dans le temps en identifiant les particules de l'instant  $t$  à l'instant  $t + 1$ . Les algorithmes de suivi Lagrangien sont basés sur la définition d'une fonction coût qu'il s'agit de minimiser. Par exemple, l'algorithme le plus simple considère qu'une particule  $j$ , qui à l'instant  $t + 1$  se trouve à la position  $x_j(t + 1)$ , doit être connectée à la particule  $i$  qui à l'instant  $t$  se trouvait le plus proche d'elle. Dans cet algorithme la fonction coût à minimiser est simplement  $\phi_{ij} = \|x_i(t) - x_j(t + 1)\|$ . Cet algorithme, dit "du plus proche voisin", est utilisé pour démarrer les trajectoires à partir des premières images. Les trajectoires sont ensuite propagées à l'aide d'un algorithme plus sophistiqué et plus robuste basé sur l'utilisation de 4 images successives [8] : les trajectoires sont supposées connues jusqu'à l'instant  $t$  ; les positions  $x_i(t)$  et  $x_i(t - 1)$  permettent d'estimer la vitesse des particules et de projeter une estimation de leur position à l'instant  $t + 1$ ,  $\tilde{x}_i(t + 1)$  ; ensuite  $x_i(t - 1)$ ,  $x_i(t)$  et  $\tilde{x}_i(t + 1)$  permettent d'estimer l'accélération de la particule et de projeter, pour chaque particule dans le voisinage de  $\tilde{x}_i(t + 1)$ , la position estimée à l'instant  $t + 2$ ,  $\tilde{x}_i(t + 2)$  ; la trajectoire la plus probable est alors obtenue en minimisant la fonction  $\phi_{ij} = \|\tilde{x}_i(t + 2) - x_j(t + 2)\|$ .

## 4 Exemple d'application

Un exemple d'application pour lequel cet outil s'est avéré extrêmement performant, concerne l'étude de la dispersion relative de paires de particules par la turbulence, un problème qui reste ouvert depuis les travaux pionniers de Richardson en 1926 [10]. Notre étude a ainsi permis les premières mesures directes en laboratoire de la dispersion relative en écoulement pleinement turbulent. La figure 3a montre un exemple de suivi expérimental d'une paire de particule se séparant sous l'effet de la turbulence. En 1950, Batchelor propose un raffinement des travaux de Richardson et montre que des particules initialement séparées d'une distance  $\Delta_0$  dans le régime inertiel, vont se séparer selon un régime superdiffusif où la séparation quadratique moyenne évolue d'abord quadratiquement avec le temps et avec une dépendance en  $\Delta_0^{2/3}$ . Richardson avait quant à lui prédit une séparation quadratique moyenne ultérieure cubique en temps et indépendante de  $\Delta_0$ . La loi de Richardson est communément admise et utilisée dans les modèles de mélange turbulent. Dans les régimes de turbulence et de séparations initiales étudiés, la figure 3b montre cependant que la prédiction de Batchelor est extrêmement bien vérifiée, sur

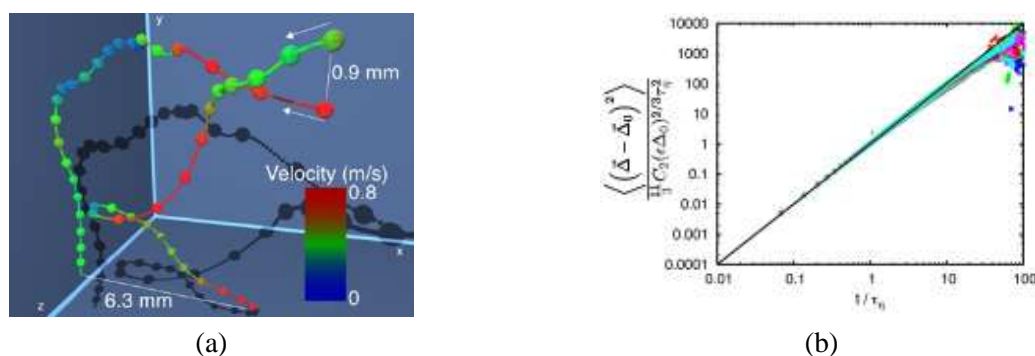


FIG. 3 – (a) Exemple de suivi Lagrangien d’une paire de particules, dispersées sous l’effet de la turbulence. (b) Évolution de la séparation quadratique moyenne entre particule en fonction du temps normalisé par  $\tau_\eta$  (les différentes courbes correspondent à des paires avec des séparations initiales  $\Delta_0$  différentes à des échelles inertielles ; 50 courbes pour  $\Delta_0$  entre 1 mm et 50 mm sont représentées).  $C_2$  est une constante sans dimension. Normalisée par la prédiction de Batchelor, les mesures pour toutes les séparations initiales se superposent rigoureusement, tandis qu’aucun comportement à la Richardson, même aux temps relativement longs n’est observé.

des temps relativement longs, alors qu’aucun signe d’un comportement à la Richardson n’est observé, contrairement à ce qui était communément admis jusque là.

## Références

- [1] Virant, M., Dracos, T. : 3D PTV and its application on lagrangian motion. *Measurement science and technology* **8** (1997) 1539–1552
- [2] Ott, S., Mann, J. : An experimental investigation of the relative diffusion of particle pairs in three-dimensional turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics* **422** (2000) 207–223
- [3] LaPorta, A., Voth, G.A., Crawford, A.M., Alexander, J., Bodenschatz, E. : Fluid particle accelerations in fully developed turbulence. *Nature* **409** (2002) 1017
- [4] Mordant, N., Metz, P., Michel, O., Pinton, J.F. : Measurement of lagrangian velocity in fully developed turbulence. *Physical Review Letters* **87**(21) (2001) 214501
- [5] Poulain, C., Mazellier, N., Gervais, P., Gagne, Y., Baudet, C. : Spectral vorticity and lagrangian velocity measurements in turbulent jets. *Flow, Turbulence and Combustion* **72** (2004) 245–271
- [6] Chertkov, M., Pumir, A., Shraiman, B. : Lagrangian tetrad dynamics and the phenomenology of turbulence. *Physics of Fluids* **11**(8) (1999) 2394–2410
- [7] Bourgoïn, M., Ouellette, N.T., Xu, H., Berg, J., Bodenschatz, E. : The role of pair dispersion in turbulent flow. *Science* **311** (2006) 835
- [8] Ouellette, N.T., Xu, H., Bodenschatz, E. : A quantitative study of three dimensional lagrangian particle tracking algorithms. *Experiments in Fluids* **40**(2) (2006) 301–313
- [9] Tsai, R. : A versatile camera calibration technique for high accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE T. Robot. Autom.* **RA-3** (1987) 323
- [10] Richardson, L.F. : Atmospheric diffusion shown on a distance-neighbour graph. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* **110**(756) (1926) 709–737