



### Le hasard en chemin : Le mouvement brownien.

Repéré par le botaniste écossais Robert Brown dès 1827, le mouvement de fines particules en suspension dans un fluide est étonnamment incessant et complètement désordonné. Ce mouvement dit brownien est dû au bombardement persistant qu'elles subissent de la part des molécules de ce même fluide. Les molécules sont totalement invisibles, seul un grand nombre de chocs contre une particule visible au microscope peut la faire dévier de façon notable s'ils ne sont pas distribués également sur toute la surface de la particule.

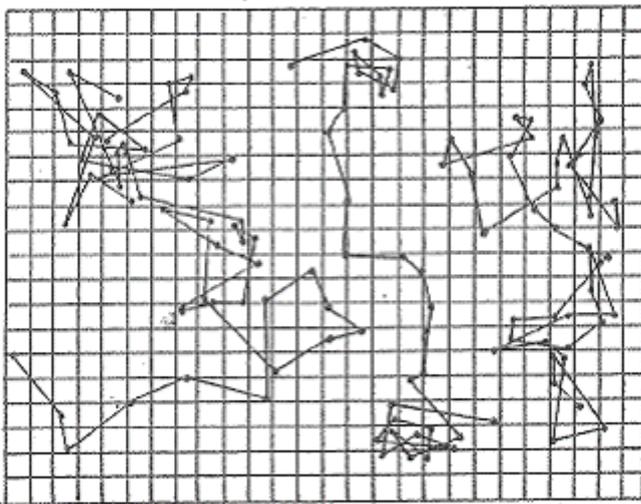


Fig 1. Positions successives de 3 particules en suspension prises toutes les 30s (16 divisions de la figure représente 50 mm). J. Perrin, Les Atomes, Gallimard, Paris, 1970, p. 166. Ref.[1,2,7]

Par conséquent, le mouvement brownien est un double phénomène aléatoire : le trajet de la particule suspendue est rendu aléatoire par les fluctuations des vitesses des molécules. En effet, le chaos moléculaire et le jeu des collisions disperse la distribution des vitesses moléculaires. Peu d'entre-elles sont très rapides, peu sont très lentes, la majorité des molécules possède une vitesse proche de la moyenne.

En 1905, Albert Einstein a montré que l'importance du mouvement brownien est directement lié aux masses des atomes et molécules ainsi qu'à la valeur du nombre d'Avogadro ( $6,02 \times 10^{23}$ ).

L'énergie cinétique moyenne d'une particule  $E_c$  est telle que :

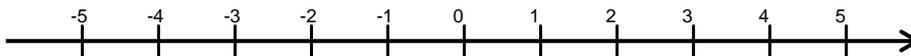
$$E_c = \frac{3}{2} k_B T \quad (k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K et } T \text{ est la température absolue en K}).$$

### La démarche de l'ivrogne.

En se déplaçant au hasard, en avant et/ou en arrière, un ivrogne titubant aboutit-il quelque part ?

Les déplacements de particules liés au mouvement brownien étant aléatoires, on peut se poser la question de savoir si ces particules finissent par tout simplement avancer !

Imaginez l'essai suivant.



Vous partez de 0. Lancez un dé : si le résultat est pair, avancez de 1 ; quand le résultat est impair, reculez de 1. Combien de lancers de dés faudra-t-il pour atteindre l'abscisse +5 ?

Il faudra d'autant plus de lancers que l'abscisse visée est éloignée du point de départ mais vous finirez par l'atteindre. C'est la démarche de l'ivrogne : tantôt il avance, tantôt il recule mais il finit par atteindre son but.

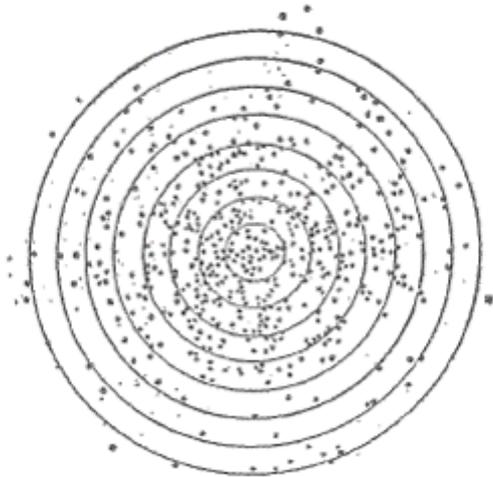
Dans la réalité, le nombre de lancers de dés représente le temps nécessaire pour qu'une particule se déplace. Ainsi, la marche aléatoire des particules implique que la diffusion au travers d'un fluide fixe le temps de parcours moyen.

C'est encore Einstein qui montra que le déplacement radial d'une particule diffusant dans toutes les directions à partir d'un point central est proportionnel à la racine carrée du temps écoulé.

$d = 2 \cdot \sqrt{D \cdot t}$  où D est le coefficient de diffusion et t est le temps en secondes.

On peut aussi montrer que  $D = \frac{k \cdot T}{6\pi\eta a}$  où  $\eta$  est la viscosité du fluide et a le rayon de la particule.

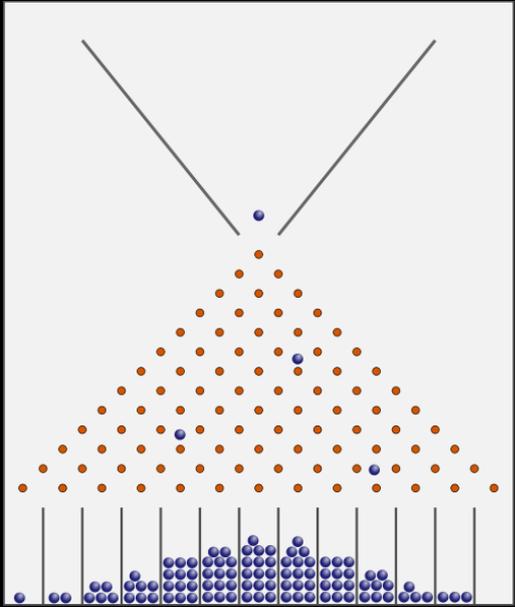
Vers 1908-1910 Jean Perrin vérifia expérimentalement les prédictions de la théorie du mouvement brownien d'Einstein en suivant au microscope le mouvement de particules microscopiques de rayon connu dans divers liquides. On voit ainsi sur la Fig. 1, l'évolution du mouvement de 3 grains de rayon  $a = 0,52 \mu\text{m}$  pointés toutes les 30 s dans un plan perpendiculaire à l'axe du microscope. La Fig. 2 représente les déplacements, ramenés à une même origine, de 500 grains pendant un temps  $t = 30\text{s}$ . Cela revient à considérer que les 500 grains auraient le même point de départ et se déplacent perpendiculairement à l'axe du microscope. Les extrémités des vecteurs ainsi obtenus se répartissent autour de l'origine commune un peu comme des balles tirées autour d'une cible.



**Fig. 2** : Positions de 500 particules à un instant  $t$  après leur départ d'une même origine  
 J. Perrin, Les Atomes, Gallimard, Paris, 1970, p. 169. Ref.[1,2]

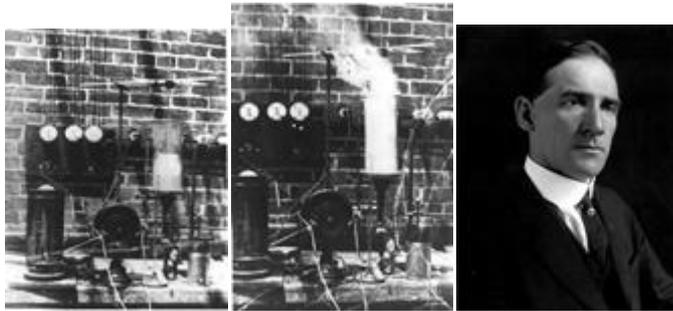
Le psychologue et statisticien anglais Galton (1822-1911) proposa une expérience célèbre (planche de Galton) qui permet de reproduire la diffusion de particules à partir d'un point situé au milieu de la planche.

Il suffit d'y laisser tomber des billes au travers d'un labyrinthe d'obstacles : le nombre de billes dans les différents compartiments indique l'importance de la diffusion à partir du centre.



### **Le hasard en chemin : la précipitation électrostatique des fumées.**

A la fin du XIXe siècle, les fumées d'usine étaient devenues partie intégrante du paysage urbain et suburbain. Frederick Cottrell (1877-1948 USA) déposa un brevet en 1908 pour un modèle de filtre électrostatique permettant de dépoussiérer les fumées et, simultanément, de récupérer les matériaux parfois réutilisables qu'elles dispersent dans l'atmosphère. Son modèle de précipitateur est aujourd'hui largement utilisé dans l'industrie et dans les incinérateurs. On l'appelle encore un Cottrell.

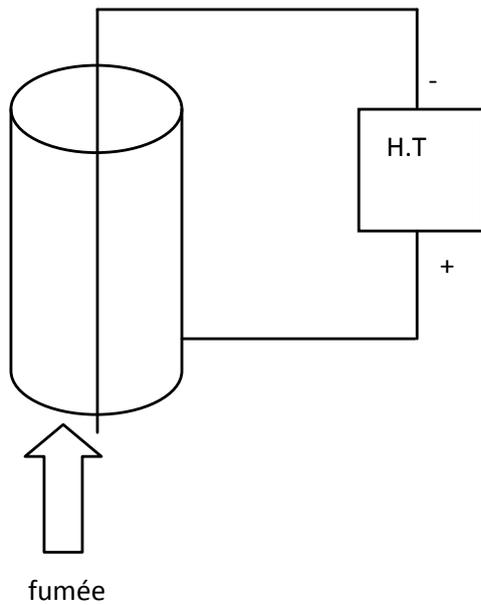


Principe de fonctionnement.

La fumée circule dans un conduit métallique (vitesse usuelle : quelques m/s) de type cylindrique. Le long de l'axe du cylindre, un fil métallique est porté à haute tension, typiquement plusieurs dizaines de milliers de volts.

Entre le fil central et le cylindre métallique, le champ électrique a une structure radiale. Il est donc plus intense au voisinage du centre, c'est-à-dire le fil. A partir de 3000 V/mm dans l'air très sec et 800 V/mm dans l'air très humide, il y a ionisation de l'air et un effet couronne (corona) s'établit autour du conducteur central : il y a ionisation partielle de l'air avec émission d'un flot d'électrons du centre vers la périphérie du tube (le fil central est porté à un potentiel négatif). Lorsque ces électrons rencontrent des poussières en chemin, ils s'y fixent et les entraînent vers le cylindre extérieur. Ces mêmes poussières se fixent alors sur les parois du tube. Il faut ensuite périodiquement secouer ou rincer le cylindre pour récupérer les agrégats de poussières qui s'y sont déposés.

Les dispositifs industriels captent ainsi près de 99% des poussières émises par les fumées.



Poussières.

Les particules respirables ont un diamètre inférieur à  $10\ \mu\text{m}$  (millièmes de mm). Les particules de combustion contenues dans la fumée de tabac par exemple sont de très faible diamètre, souvent inférieur à  $1\ \mu\text{m}$ .

Les particules non respirables sont constituées d'allergènes comme les pollens ; leur diamètre peut aller jusqu'à  $50$  ou  $100\ \mu\text{m}$ . Les plus grosses particules ne séjournent pas longtemps dans l'air étant donnée leur tendance à sédimenter rapidement au sol et sur les surfaces voisines.

Les précipitateurs électrostatiques sont conçus pour filtrer les particules d'environ  $5\ \mu\text{m}$  de diamètre telles que celles présentes dans la poussière de ciment et les vapeurs acides.

Masse des poussières.

En les supposant sphériques, en carbone et de diamètre égal à  $5\ \mu\text{m}$  :

$$\text{Volume} = 0.653 \times 10^{-16}\ \text{m}^3$$

$$\text{Masse} = 0.210 \times 10^{-11}\ \text{kg}$$

Caractéristiques du dispositif utilisé :

$$U = 12\ 000\ \text{V} \text{ (dans l'industrie, } 60\ \text{kV)}$$

Diamètre du fil central :  $1\ \text{mm}$

Diamètre du cylindre =  $5,6\ \text{cm}$

Hauteur du cylindre =  $30\ \text{cm}$  (dans la réalité, une dizaine de mètres).

Le tube et le fil constituent un condensateur cylindrique et  $C = 2\pi\epsilon_0 h / \ln(b/a)$  en négligeant les effets de bord.

$$C = 0.413 \times 10^{-11} \text{ F}$$

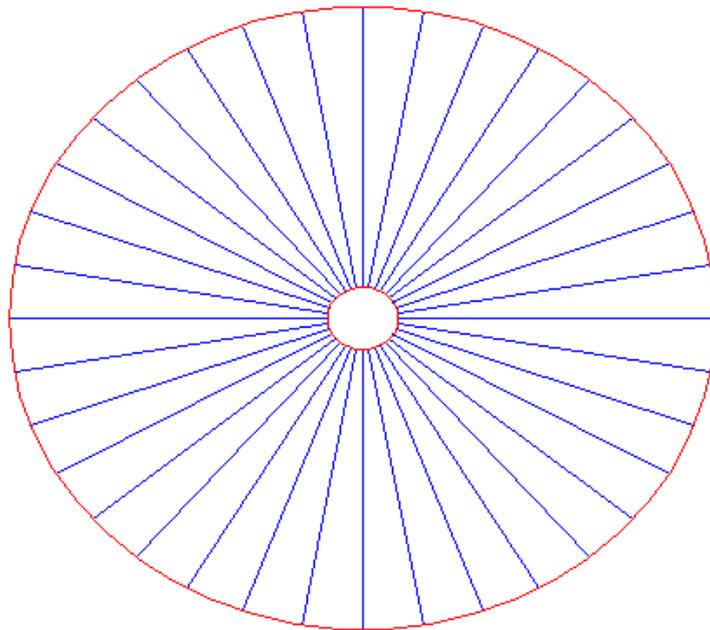
$$Q = 0.496 \times 10^{-7} \text{ C}$$

Champ électrique dans le dispositif :

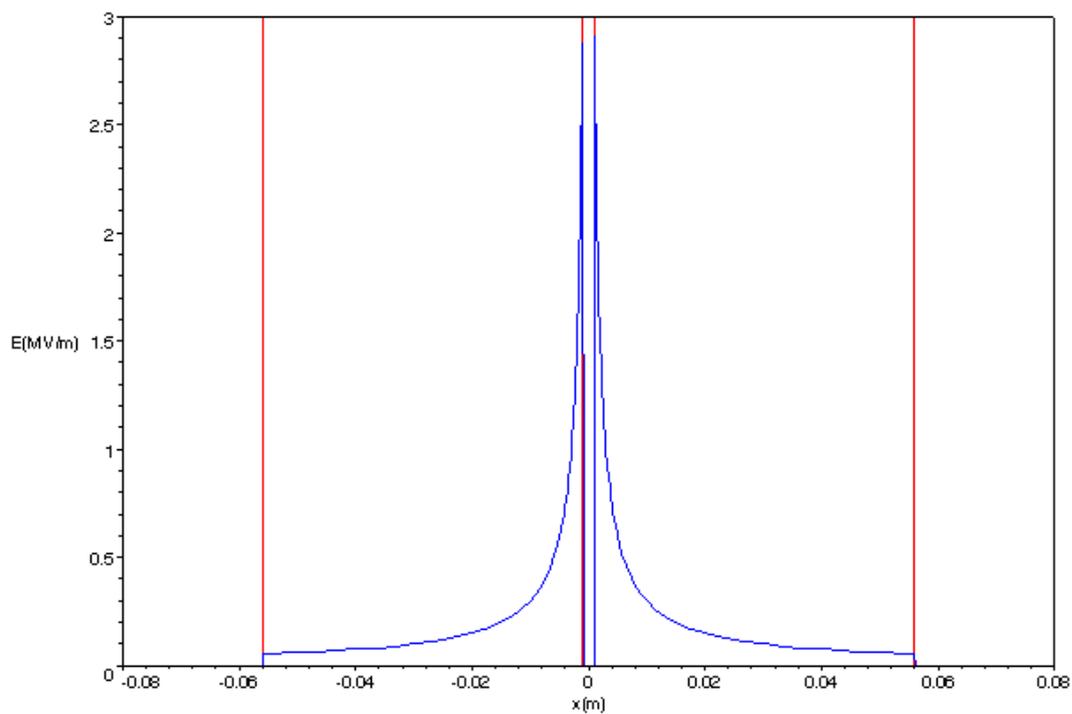
Les équipotentielles sont des cercles concentriques autour du fil central.

A distance  $x$  du fil,  $E = 2k\lambda/x$  où  $\lambda$  est la charge électrique par unité de longueur sur le fil central.

**Lignes de champ électrique dans le cylindre**

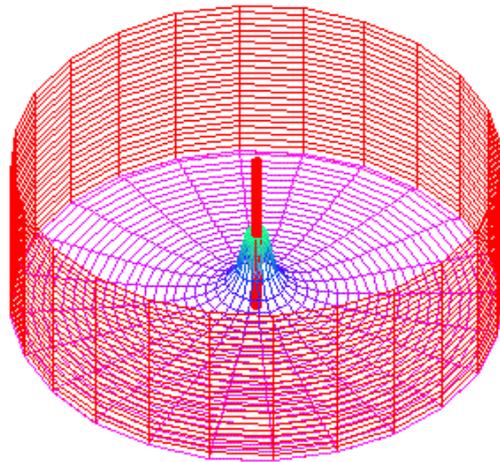


**champ électrique du précipitateur - vue en coupe**



En rouge : le fil central et la cheminée. En dégradé de couleurs : la valeur du champ électrique en fonction de l'écart au fil central. Bleu = faible champ électrique. Vert = champ électrique intense.

#### champ électrique dans la cheminée



#### Notes sur les précipitateurs industriels.

Bruxelles : l'incinérateur de Vilvorde, près de Bruxelles, est muni d'un tel dispositif.

Vapeurs acides : la précipitation électrostatique agit aussi sur les vapeurs acides ; dans ce cas, un liquide neutralisant (basique) coule directement le long des parois de la cheminée.

Les précipitateurs électrostatiques de fumées sont très utilisés à la sortie des usines brûlant du charbon et des cimenteries ainsi que dans les tunnels routiers.

Les modèles récents de précipitateurs utilisent un réseau de fils à effet de couronne suivi d'un groupe de plaques métalliques parallèles mises à la terre. Ces mêmes plaques sont fréquemment secouées afin de les débarrasser des poussières.

Il existe également des versions miniaturisées à usage domestique (purificateurs d'air).

Avantage sur le système à filtre : le précipitateur électrostatique s'encrasse moins vite et permet de retenir des particules plus fines que les systèmes à filtres.

Pollution : les limites fixées par l'OMS en matière de pollution atmosphérique sont  $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les particules,  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour l'ozone et  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les NOx.

Interception des virus, bactéries : apparemment celle-ci n'est que très partielle.

Défaut du procédé : la production non négligeable d'ozone qui est un polluant au niveau du sol.