

Bruit et intermittence du transport électrique dans les milieux granulaires

M. Creyssels, E. Falcon et B. Castaing

Laboratoire de Physique, UMR 5672, Ecole Normale Supérieure de Lyon
46 allée d'Italie, 69364 Lyon cedex 07, France
mathieu.creyssels@ens-lyon.fr

Résumé

Nous nous intéressons à l'influence des effets collectifs de la matière granulaire sur ses propriétés électriques. Appliquons une tension électrique constante aux bornes d'une poudre métallique. Sous certaines conditions, l'évolution temporelle du courant qui la traverse est alors très bruitée [1, 2]. Nous montrons alors que ce bruit électrique (fluctuations temporelles de courant) possède d'intéressantes propriétés *d'invariance d'échelle* (sur 4 décades en temps) et *d'intermittence*, avec des similarités et des différences avec la turbulence hydrodynamique [2]. Ces étonnants phénomènes sont reliés aux effets collectifs de la matière granulaire.

1 Dispositif expérimental

Le milieu granulaire considéré est de la poudre de cuivre [3] constituée de grains quasi-sphériques de diamètre de l'ordre de $100\ \mu\text{m}$ (Fig. 2a). Un échantillon (3.5 grammes) est placé dans un cylindre de plexiglas, fermé par deux électrodes en laiton, le tout confiné dans un bâti en laiton (Fig. 1b). La hauteur de la poudre est d'environ 5 mm, correspondant à 500000 particules environ. Une pression mécanique pouvant atteindre $200\ \text{kg}/\text{cm}^2$ est appliquée à la poudre, que nous laissons relaxer pendant un jour, avant d'entreprendre les mesures électriques.

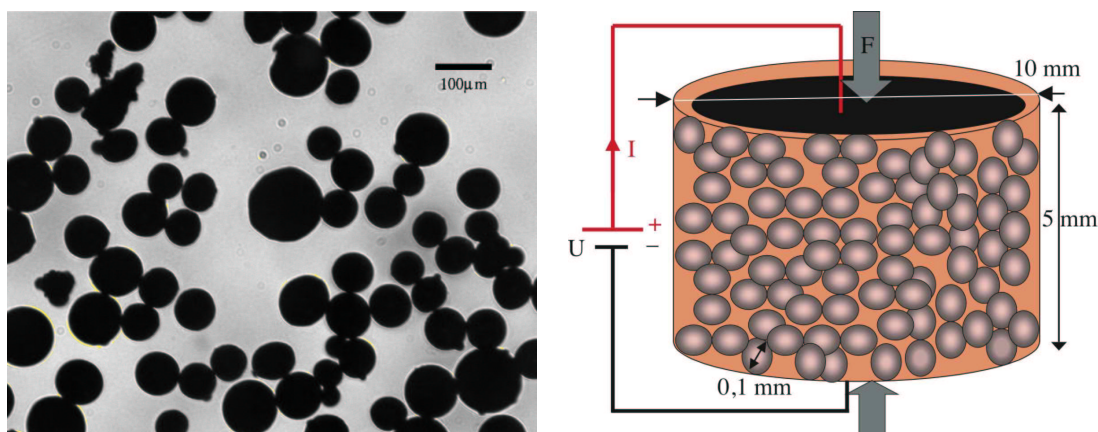


FIG. 1 – (a) Photo de la poudre de cuivre au microscope. (b) Schéma de l'expérience.

Une tension électrique (U) est appliquée à l'échantillon et nous mesurons le courant (I) le traversant ; sa résistance étant $R = U/I$. Deux fils peuvent être introduits à l'intérieur de la poudre pour vérifier que la résistance du massif n'est pas contrôlée par l'interface

poudre - électrode. Avant chaque nouvelle expérience, l'échantillon est remplacé avec de la poudre neuve. Cette procédure permet d'obtenir une meilleure reproductibilité qu'en ramenant simplement la pression à zéro et en secouant la poudre.

2 Caractéristique électrique : transition isolant - conducteur

A force F fixée et à faible tension, la résistance de la poudre est élevée ($R_0(F) \sim M\Omega$), du fait de la couche d'oxyde présente à la surface des particules. Lorsque U augmente, la caractéristique $R - U$ devient non linéaire (Fig. 2a). Au-delà d'une valeur critique U_c , une transition apparaît de cet état quasi-insolant vers un état conducteur. Si U est maintenant abaissée, la résistance de la poudre garde sa faible valeur¹. La tension critique U_c dépend de la force appliquée à la poudre. Cependant, le seuil de transition correspond toujours à la même puissance dissipée $P_c \equiv U_c^2/R_0 \sim 10^{-4}W$ quelle que soit la contrainte appliquée (Fig. 2b). Ceci suggère que la transition provient d'une instabilité thermique.

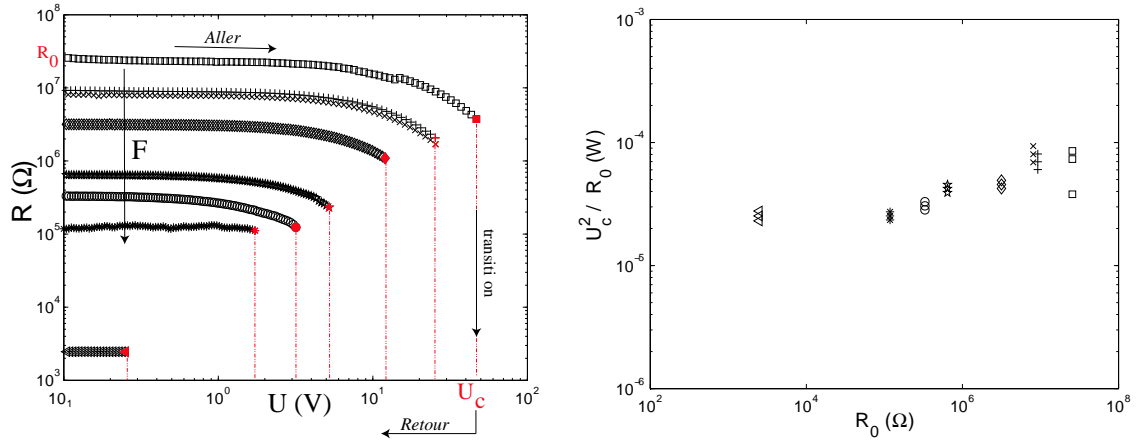


FIG. 2 – (a) Caractéristique résistance - tension pour de la poudre de cuivre soumise à différentes forces, F . A faible tension, la résistance est élevée et de valeur $R_0(F)$. Pour chaque F , une transition de l'état isolant à conducteur apparaît lorsque $U = U_c(F)$. Au delà de U_c , la résistance est faible. (b) La transition a lieu pour une puissance dissipée pratiquement constante $U_c^2/R_0 \sim 10^{-4} W$ sur 4 décades en R_0 .

3 Bruit et invariance d'échelle

Pour une tension appliquée telle que $P < P_c$, l'évolution temporelle du courant est relativement stable. En revanche, si $P > P_c$, le courant augmente brutalement (transition étudiée au §2) puis il continue à croître avec des fluctuations temporelles très importantes. Afin d'étudier ces fluctuations de courant, on le rend stationnaire en abaissant la tension appliquée à la poudre. Ainsi, on ralentit la croissance du courant (la tendance s'inverse même en dessous d'une certaine tension) tout en conservant son caractère très bruyé (voir encarts Fig. 3). Les outils usuels du traitement du signal (analyse spectrale) et ceux plus

1. Cette transition de conduction irréversible semble similaire à l'effet *Branly* continu précédemment étudié dans une chaîne de billes [4].

sophistiqués développés dans le cadre de la turbulence hydrodynamique peuvent alors être appliqués sur un tel bruit quasi-stationnaire dans ce système granulaire.

Les fluctuations de courant sont enregistrées à basse et à haute fréquence d'échantillonnage (respectivement à $f_b = 50$ Hz et $f_h = 330$ kHz) pendant 18 jours et 1 heure respectivement. La densité spectrale des fluctuations de courant est montrée sur la Fig. 3. Son comportement en loi de puissance sur quatre décades en fréquence ($0.1 \text{ Hz} < f < 1 \text{ kHz}$) est impressionnant. Cette invariance d'échelle est stoppée à basse fréquence par le temps de diffusion typique d'une perturbation thermique à l'intérieur de l'échantillon, estimé à 10 s. L'accord avec cet ordre de grandeur confirme là encore l'hypothèse d'un phénomène activé thermiquement. L'échantillon de poudre a aussi un comportement capacitif modélisé par une capacité en parallèle avec la résistance et $RC\omega \sim 1$ pour $\omega \sim 10^4$ Hz. On observe ainsi une coupure du spectre à haute fréquence.

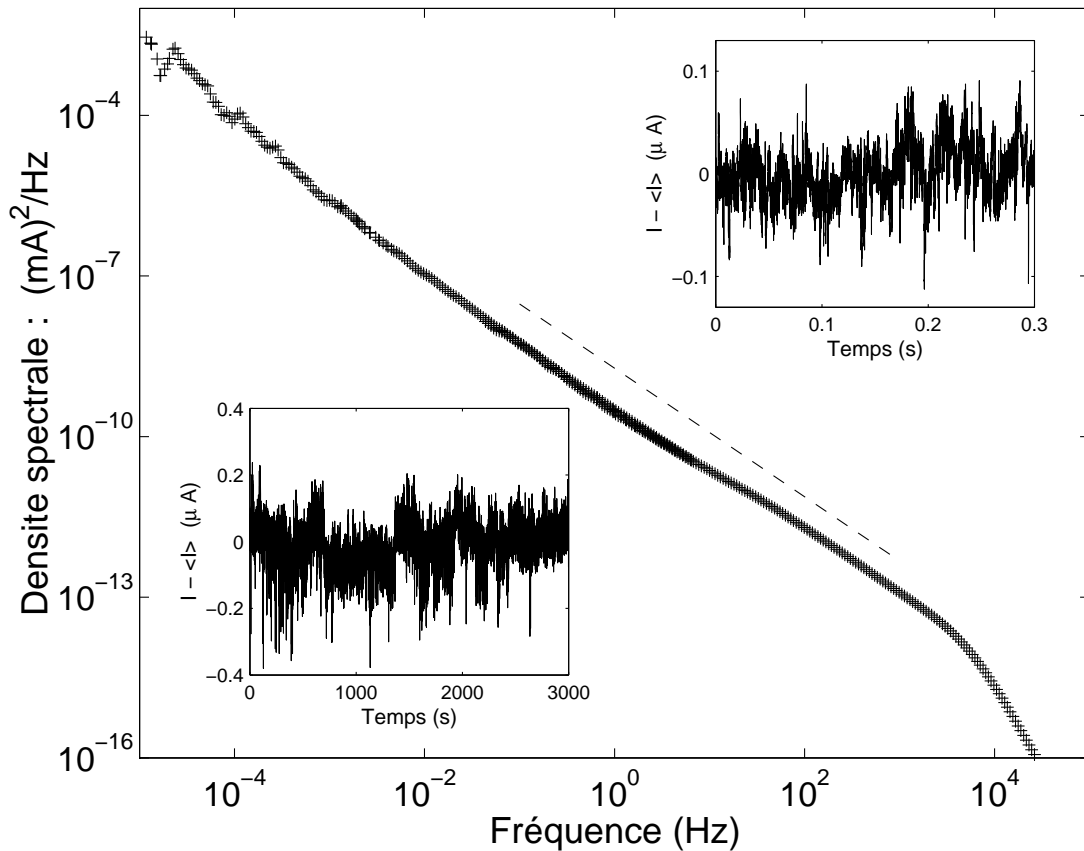


FIG. 3 – Densité spectrale des fluctuations de courant électrique. L'invariance d'échelle est observée sur 4 décades en fréquence. La droite en traits pointillés est de pente -1.2 correspondant à $f^{-1.2}$. Encarts: fluctuations typiques quasi-stationnaires du courant observées pendant 3000s (encart à gauche) et 0.3s (encart à droite); $R \sim 100 \text{ k}\Omega$ et $U \sim V$.

Pour comprendre l'origine du bruit observé, deux modélisations différentes du comportement électrique de la poudre apparaissent : les fluctuations de courant sont soit engendrées par l'analogie d'un générateur de courant placé en parallèle avec une résistance constante ; soit par la résistance même de la poudre qui fluctue avec le temps. Dans le premier cas, l'amplitude des fluctuations ne devraient varier guère avec la tension appliquée à l'échantillon tandis que dans le second cas, les fluctuations de courant provoquées par les

variations de résistance doivent être d'autant plus importantes que la tension est grande. La mesure précédente de la densité spectrale de ces fluctuations est alors réitérée pour diverses tensions appliquées. L'invariance d'échelle persiste et l'amplitude du spectre augmente avec U (Fig. 4a). La figure 4b montre la proportionnalité entre la densité spectrale des fluctuations et le carré de la tension appliquée. Cette observation valide le modèle de bruit de résistance: les fluctuations de courant observées sont provoquées par des variations de la résistance de la poudre au cours du temps.

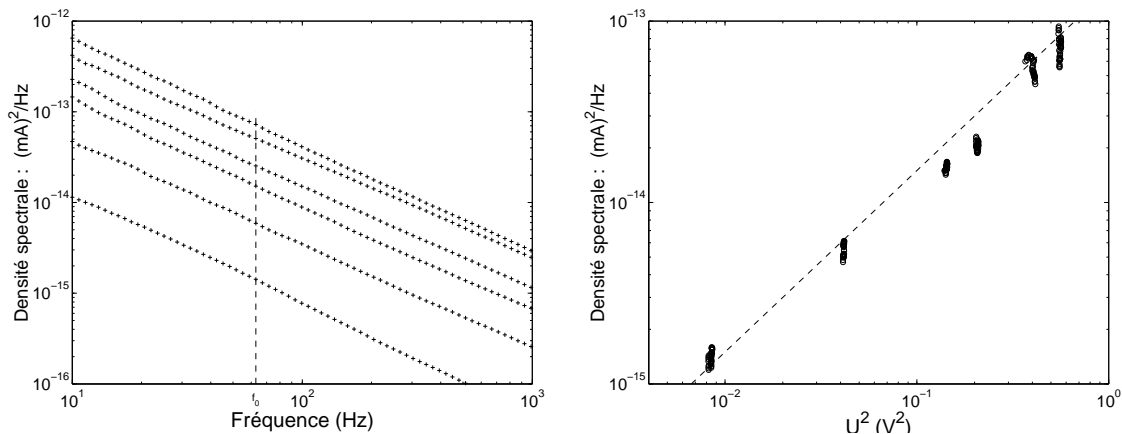


FIG. 4 – (a) Densités spectrales pour différentes tensions appliquées, U croît de bas en haut. (b) Amplitudes des densités spectrales mesurées à la fréquence $f_0 = 64\text{Hz}$ en fonction du carré de la tension appliquée à la poudre. La droite en traits pointillés est de pente 1.

4 Interprétation du bruit

Comme montré au §2, la puissance dissipée dans la poudre est le paramètre moteur de la transition isolant - conducteur. On peut penser que l'échauffement local entre grains change les propriétés électriques du contact, mais alors plusieurs centaines de degrés doivent être atteints [4]. La puissance dissipée à l'échelle d'un grain est tellement faible qu'il semble peu crédible qu'elle engendre des températures aussi élevées. Un autre mécanisme possible pour expliquer ce bruit fait intervenir un processus collectif de dilatation thermique des grains. La distribution des contacts dans la poudre est très inhomogène ce qui engendre aussi une distribution inhomogène des courants. Ainsi, l'échauffement local par effet Joule devrait modifier le réseau très inhomogène des forces au sein de la poudre. De très faibles dilatations thermiques des grains peuvent alors engendrer des changements dramatiques des lignes de courant, et donc de la distribution de ces échauffements locaux, et ainsi de suite. Ces dilatations peuvent intervenir à n'importe quelle échelle spatiale (de la taille du grain à la taille totale de l'échantillon) ce qui se traduit par un spectre fréquentiel ne présentant aucun pic caractéristique et une invariance d'échelle.

5 Intermittence

Le bruit observé précédemment possède une distribution d'amplitudes essentiellement gaussienne. Pour se rendre compte qu'il exhibe des variations sur une large gamme d'échelles de temps, il est plus pertinent d'étudier, en fonction d'un temps τ de séparation,

le comportement de l'incrément de courant $\delta I_\tau = I(t + \tau) - I(t)$. La figure 5a montre les fonctions de densité de probabilité (PDF) de ces incréments de courant pour trois échelles de temps testées. Notons d'abord que chaque PDF est symétrique. Les événements diminuant la résistance sont donc symétriques de ceux qui l'augmentent. Si on compare maintenant ces trois PDF, on remarque que leur forme change avec l'échelle de temps τ testée: ce phénomène est baptisé "intermittence". A temps long, la distribution des δI_τ tend vers une gaussienne, alors qu'aux petits τ , la queue se déforme. Les événements intenses (grandes valeurs de δI_τ) sont plus probables à petit temps qu'à temps long.

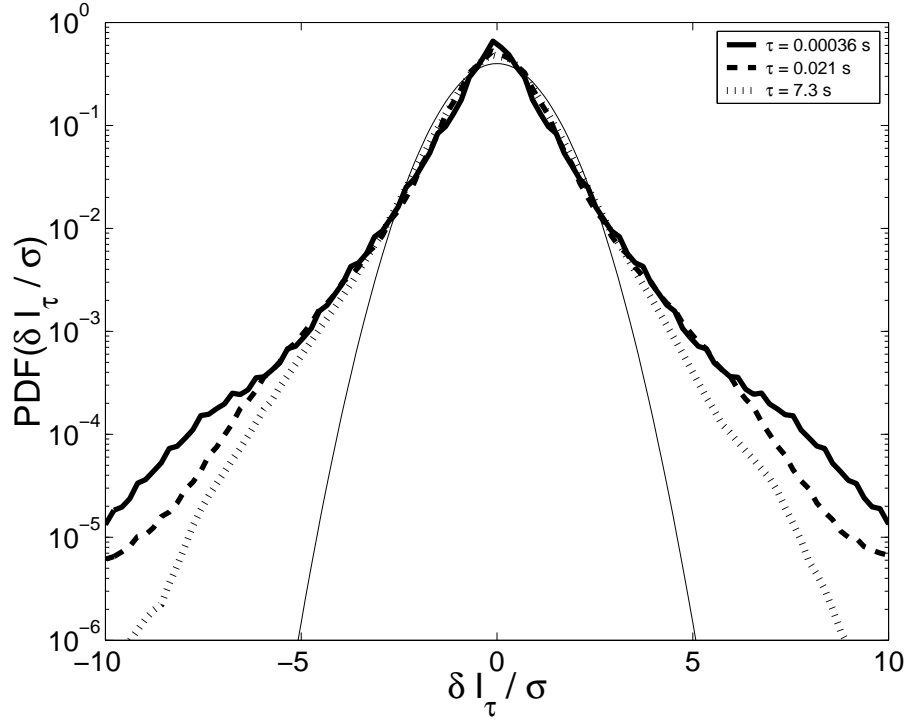


FIG. 5 – Fonctions de densité de probabilité (PDF) des incréments de courant δI_τ (normalisées par les écart-types σ) pour différentes échelles de temps testées. La courbe en trait plein représente la PDF de la gaussienne.

On définit la fonction de structure d'ordre n par: $S_n(\tau) = \langle [\delta I_\tau - \langle \delta I_\tau \rangle]^n \rangle$, où $\langle . \rangle$ représente une moyenne au cours du temps. Chaque PDF est centrée en zéro et normalisée par son écart-type $\sigma = \sqrt{S_2(\tau)}$. De plus, la distribution étant symétrique, la fonction de structure d'ordre 3, $S_3(\tau)$, est nulle. Pour caractériser l'évolution de l'intermittence à travers les échelles, la fonction de structure d'ordre 4 est étudiée ou traditionnellement, le coefficient d'aplatissement (flatness) défini par $S_4(\tau)/S_2(\tau)^2$. La Fig. 6 montre que la flatness est une loi de puissance de l'échelle de temps testée τ . L'explication est la suivante. Les fluctuations de courant ne présentant aucune fréquence caractéristique dans la bande de 0.1 Hz - 1 kHz (Fig. 3), toutes les fonctions de structure $S_n(\tau)$ devraient être des lois de puissance de τ . Les encarts de la Fig. 6 montrent qu'en effet $S_2(\tau) \sim \tau^{\alpha_2}$ avec $\alpha_2 = 0.19$ et $S_4(\tau) \sim \tau^{\alpha_4}$ avec $\alpha_4 = 0.33$; et ainsi pour la flatness $S_4(\tau)/S_2(\tau)^2 \sim \tau^{\alpha_4 - 2\alpha_2}$. Par ailleurs, le fait que $\alpha_4 \neq 2\alpha_2$ est la signature de l'intermittence, la forme des PDF change donc avec τ (Fig. 5).

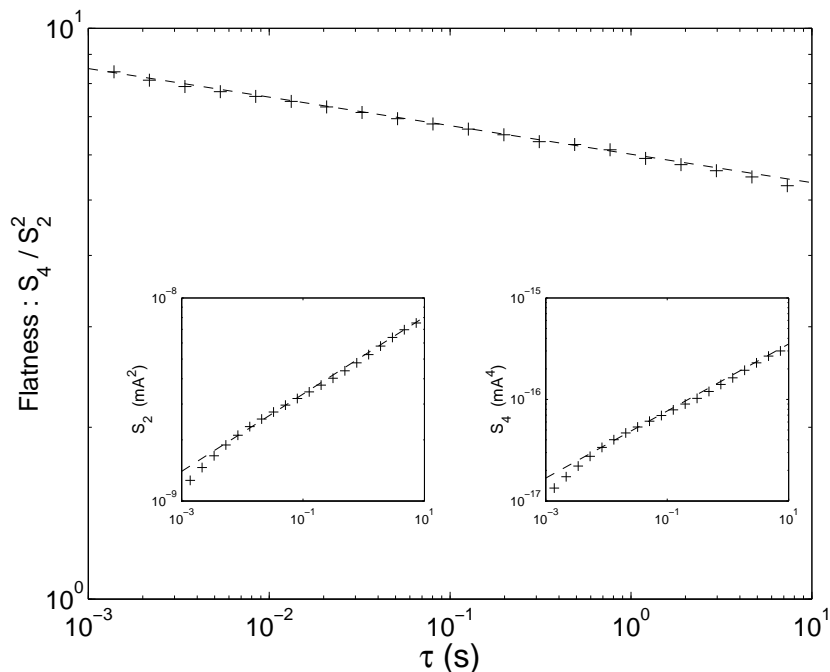


FIG. 6 – Flatness en fonction de l'échelle de temps τ testée. La droite en traits pointillés est de pente correspondant à $\tau^{-0.05}$. Encart à gauche: fonction de structure d'ordre 2, la droite en traits pointillés est de pente $\alpha_2 = 0.19$ ($S_2 \sim \tau^{0.19}$). Encart à droite: fonction de structure d'ordre 4, la droite en traits pointillés est de pente $\alpha_4 = 0.33$ ($S_4 \sim \tau^{0.33}$).

6 Conclusion et perspectives

Un échantillon de poudre de cuivre comprimée présente une résistance électrique élevée due à la couche d'oxyde présente sur les grains. Nous observons que ces caractéristiques courant - tension sont non linéaires et une transition apparaît vers un état conducteur à relativement faible tension appliquée. L'évolution temporelle du courant à travers la poudre est alors très bruitée et le bruit possède d'intéressantes propriétés d'invariance d'échelle et d'intermittence. La dissipation de la chaleur joue un rôle essentiel dans ce système. Un processus collectif de dilatation thermique créant et détruisant localement des contacts permet d'expliquer le bruit observé dans ce milieu granulaire. Une étude plus longue est en cours pour comprendre l'origine physique de l'intermittence.

Références

- [1] G. Kamarinos, A. Chovet, *Conducteurs granulaires, Proceedings SEE*, édité par E. Guyon (Palais de la Découverte, Paris) pp. 181-184, (1990).
- [2] E. Falcon, B. Castaing, C. Laroche, "Turbulent" electrical transport in Copper powders, *Europhys. Lett.* **65**, 186 (2004); E. Falcon, B. Castaing & M. Creyssels, *Bull. SFP*, à paraître (2005).
- [3] *Goodfellow Product Catalogue*, site web du fabricant: <http://www.goodfellow.com/>
- [4] E. Falcon, B. Castaing, M. Creyssels, *Nonlinear electrical conductivity in a 1D granular medium*, *Eur. Phys. J. B* **38**, 475 (2004).