

Vieillessement dans les systèmes physiques complexes

Estelle Pitard
LCVN -Institut de Physique
CNRS-Université Montpellier 2
France

De nombreux matériaux sont désordonnés et possèdent une dynamique de relaxation très lente, hors équilibre. Je donnerai un panorama des concepts qui ont émergé dans ce domaine, en les illustrant par des observations expérimentales et des modèles simples.

Après avoir présenté ce que l'on entend par dynamique hors équilibre, je définirai le vieillissement et en donnerai des exemples. Un modèle simple qui reproduit ce phénomène est un modèle basé sur une distribution de pièges d'énergie.

Je présenterai des expériences d'effet mémoire qui ont été faites dans ces matériaux désordonnés, ainsi que leur interprétation. Enfin, je montrerai que l'on peut construire un formalisme théorique des histoires dans ce système, en différenciant les histoires chaotiques et les histoires bloquées.

Références

1. Dynamics of glassy systems, L. Cugliandolo, Lecture notes, Les Houches, July 2002, [arXiv:cond-mat/0210312](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0210312).
2. Models of traps and glass phenomenology, C. Monthus, J-P. Bouchaud, J. Phys. A 29 (1996) 3847, [arXiv:cond-mat/9601012](https://arxiv.org/abs/cond-mat/9601012).
3. Aging in glassy systems: new experiments, simple models and open questions, J-P Bouchaud, published in: 'Soft and Fragile Matter: Nonequilibrium Dynamics, Metastability and Flow', M. E. Cates and M. R. Evans, Eds., IOP Publishing (Bristol and Philadelphia) 2000, pp 285-304, [arXiv:cond-mat/9910387](https://arxiv.org/abs/cond-mat/9910387).
4. Comparative review of aging properties in spin glasses and other disordered systems, J. Hammann et al. J. Phys. Soc. Jpn. 69 (2000) Suppl. A, pp. 206-211, [arXiv:cond-mat/9911269](https://arxiv.org/abs/cond-mat/9911269)
5. The Kovacs effect in model glasses, E. Bertin et al. J. Phys. A: Math. Gen. 36, 10701 - 10719 (2003), [arXiv:cond-mat/0306089](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0306089).
6. Kovacs effect in facilitated spin models of strong and fragile glasses, J. Arenzon, M. Sellitto, Eur. Phys. J. B 42, 543-548 (2004), [arXiv:cond-mat/0408405](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0408405).
7. F. Ritort, P. Sollich, Glassy dynamics of kinetically constrained models, Advances in Physics, 52:219-342, 2003, [arXiv:cond-mat/0210382](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0210382).
8. Dynamic first-order transition in kinetically constrained models of glasses', J.P. Garrahan,

R.L. Jack, V. Lecomte, E. Pitard, K. van Duijvendijk, F. van Wijland, Phys. Rev. Lett. 98, 195702, (2007), [arXiv:cond-mat/0701757](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0701757).

9. First-order dynamical phase transition in models of glasses: an approach based on ensembles of histories, J.P. Garrahan, R.L. Jack, V. Lecomte, E. Pitard, K. van Duijvendijk, F. van Wijland, J. Phys. A 42, (2009), [arXiv:0810.5298](https://arxiv.org/abs/0810.5298).

Les liens internet sont disponibles sur: <http://xxx.lanl.gov/>

Vieillessement dans les systèmes physiques complexes

E. Pitard¹

¹Laboratoire de Physique
Université Montpellier 2-CNRS

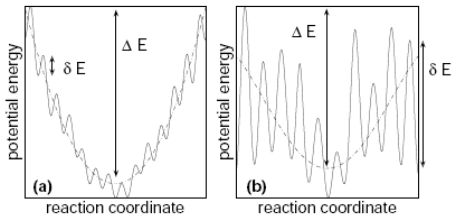
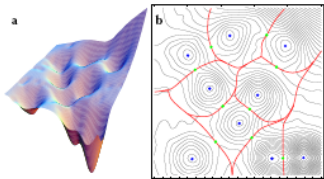
Ecole de Berder, Histoire et Mémoire en Biologie, 29 mars- 4 avril
2010.

Plan de la présentation

- Introduction: Systèmes en équilibre / hors équilibre.
- Qu'est-ce que le vieillissement -Exemples.
- Modèles de pièges.
- Effets mémoire et effet Kovacs.
- Thermodynamique des histoires.

Systèmes en équilibre / hors équilibre

- En physique statistique, les propriétés globales peuvent être déterminées par les interactions microscopiques entre particules (hamiltonien H).
- Les propriétés **d'équilibre** s'obtiennent en minimisant une énergie libre f .
- $Z = \sum_c e^{-\beta H(c)} \sim e^{-Nf(\beta)}$, $N \rightarrow \infty$, $\beta = 1/T$, T : température.
- Paysages d'énergie: "rugueux" ou pas.

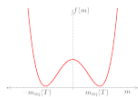


- Comment mettre un système **hors équilibre**?
 - Saut de température $T_+ \rightarrow T_-$: recherche de l'équilibre, vieillissement.
 - Forçage extérieur: flux de particules, états stationnaires hors équilibre, pas de vieillissement.

Qu'est-ce que le vieillissement -Exemples

- Absence de stationarité; pas d'invariance des propriétés dynamique par translation dans le temps.
- Relaxation/Réponse à une perturbation plus lente avec l'âge t_w .

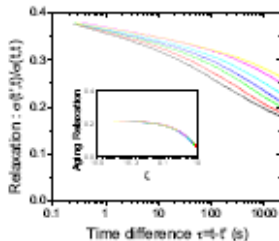
Exemple 1: Coarsening



- Croissance de domaines ferromagnétiques, $T = +\infty \rightarrow T < T_c$.
- $s_i = \pm 1, i = 1, \dots, N, m = \langle \sum_i s_i \rangle / N$.
- $T > T_c, m = 0$
- $T < T_c, m = \pm m_{eq}(T)$
- $R(t_w) = u(T)t_w^{1/z}, z > 1$.
- $R'(t_w) \propto t_w^{1/z-1}$ diminue avec t_w .

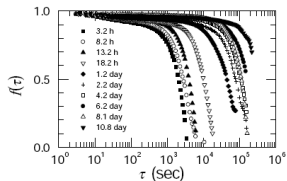
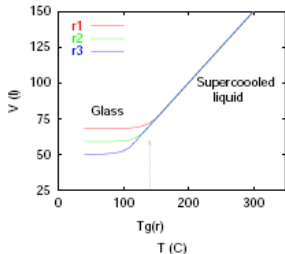
Exemple 2: Verres de spins

$$H = - \sum_{i,j} J_{ij} s_i s_j$$



$$C(t_w, t_w + \tau) = \frac{1}{N} \sum_i \langle s_i(t_w) s_i(t_w + \tau) \rangle$$

Exemple 3: Verres et gels



$$F_q(t_w, t_w + \tau) = \frac{1}{N} \sum_i \langle \exp[i\vec{q} \cdot (\vec{r}_i(t_w) - \vec{r}_i(t_w + \tau))] \rangle$$

Exemple 4: Polymères

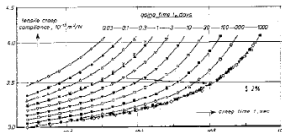
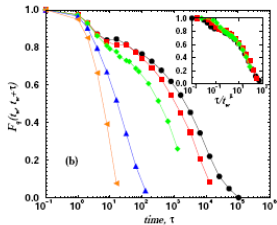
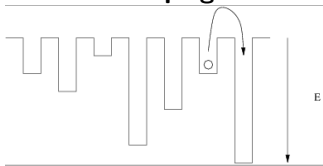


Fig. 1. Response of a PVC sample submitted to a small stress after aging during t_w , as a function of time (from¹¹).

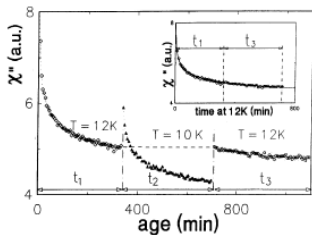
Modèles de pièges



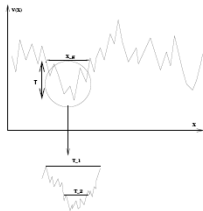
- Distribution de barrières d'énergie (Random Energy Model):
 $\rho(E) = \frac{1}{T_c} e^{-E/T_c}, E > 0.$

- Les taux de transition ne dépendent que de l'état de départ: $\tau_{i \rightarrow j} = \tau_0 e^{E_i/T}$.
- Distribution des temps de piégeage: $\psi(\tau) = \mu \frac{\tau_0^\mu}{\tau^{1+\mu}}$, où $\mu = \frac{T}{T_c}$.
- $C(t_w, t_w + \tau) = 1$ si le système est resté dans le même piège entre t_w et $t_w + \tau$, $C(t_w, t_w + \tau) = 0$ sinon.
- $\mu < 1$: vieillissement: $\langle C(t_w, t_w + \tau) \rangle = F\left(\frac{\tau}{t_w}\right)$
- $\mu > 1$: pas de vieillissement: $\langle C(t_w, t_w + \tau) \rangle = \hat{C}(\tau)$
- Probabilité qu'il y ait un saut à t_w :
 - $P(t_w) \simeq \frac{t_w^{\mu-1}}{\tau_0^\mu}$ si $\mu < 1$: diminue avec t_w .
 - $P(t_w) = \text{cste}$ si $\mu > 1$.

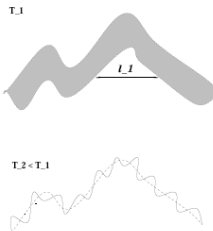
Effets mémoire dans les verres de spins



Mémoire et réjuvenation d'un verre de spins (\neq ferromagnétique).

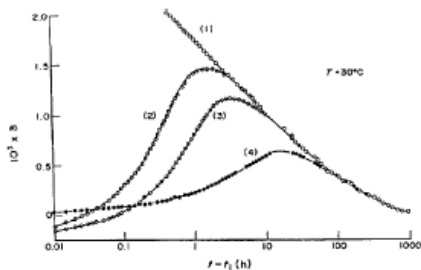


Paysage d'énergie hiérarchique.



Fluctuations des parois de domaines.

Effet Kovacs



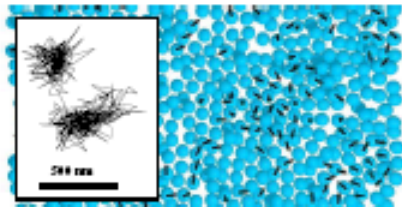
Relaxation du volume dans un verre
 $T_+ \rightarrow T_2$, jusqu'à $v_{eq}(T_2)$.

- On fait une autre relaxation $T_+ \rightarrow T_1$, où $T_1 < T_2$, jusqu'à $v = v_{eq}(T_2)$: le système n'est pas à l'équilibre!
- On réaugmente la température $T_1 \rightarrow T_2$, \rightarrow comportement non-monotone de v , convergence vers $v_{eq}(T_2)$.
- Réactivation des modes rapides de T_2 , mémoire des modes lents de T_1 .

Thermodynamique des histoires

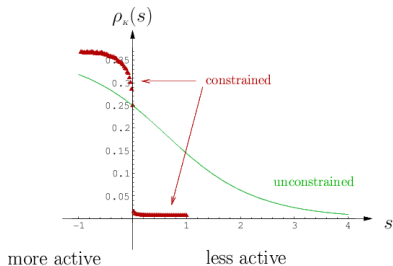
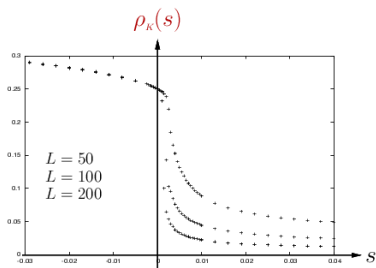
- La dynamique d'un matériau complexe est hétérogène spatialement: zones mobiles/ zones immobiles → coopérativité des réarrangements.

Histoire: $C_0 \rightarrow C_1 \rightarrow \dots \rightarrow C_{t-1} \rightarrow C_t$.



- Thermodynamique des **histoires** en fonction de leur *activité* et d'une "température" s / Analogie avec la thermodynamique des **configurations** en fonction de leur *énergie* et d'une température T .

- Complexité: Coexistence entre histoires actives "chaotiques" et histoires inactives ou "bloquées".



Références <http://xxx.lanl.gov/>

1. Dynamics of glassy systems, L. Cugliandolo, Lecture notes, Les Houches, July 2002, arXiv:cond-mat/0210312.
2. Models of traps and glass phenomenology, C. Monthus, J-P. Bouchaud, J. Phys. A 29 (1996) 3847, arXiv:cond-mat/9601012.
3. Aging in glassy systems: new experiments, simple models and open questions, J-P Bouchaud, published in: 'Soft and Fragile Matter: Nonequilibrium Dynamics, Metastability and Flow', M. E. Cates and M. R. Evans, Eds., IOP Publishing (Bristol and Philadelphia) 2000, pp 285-304, arXiv:cond-mat/9910387.
4. Comparative review of aging properties in spin glasses and other disordered systems, J. Hammann et al. J. Phys. Soc. Jpn. 69 (2000) Suppl. A, pp. 206-211, arXiv:cond-mat/9911269.
5. The Kovacs effect in model glasses, E. Bertin et al. J. Phys. A: Math. Gen. 36, 10701 - 10719 (2003), arXiv:cond-mat/0306089.
6. Kovacs effect in facilitated spin models of strong and fragile glasses, J. Arenzon, M. Sellitto, Eur. Phys. J. B 42, 543-548 (2004), arXiv:cond-mat/0408405.
- F. Ritort, P. Sollich, Glassy dynamics of kinetically constrained models, Advances in Physics, 52:219-342, 2003, arXiv:cond-mat/0210382.
8. Dynamic first-order transition in kinetically constrained models of glasses, J.P. Garrahan, R.L. Jack, V. Lecomte, E. Pitard, K. van Duijvendijk, F. van Wijland, Phys. Rev. Lett. 98, 195702 (2007), arXiv:cond-mat/0701757.
9. First-order dynamical phase transition in models of glasses: an approach based on ensembles of histories, J.P. Garrahan, R.L. Jack, V. Lecomte, E. Pitard, K. van Duijvendijk, F. van Wijland, J. Phys. A 42 (2009), arXiv:0810.5298.