

UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE DE PHYSIQUE DE LA RÉGION PARISIENNE
LABORATOIRE DE PHYSIQUE THÉORIQUE ET MODÈLES STATISTIQUES

DISCIPLINE : PHYSIQUE STATISTIQUE/THEORIQUE

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue le 10 Septembre 2014 par

François P. Landes

**Interfaces viscoélastiques
sous forçage en milieu aléatoire et
applications à la friction**

Directeur de thèse : Alberto Rosso

Composition du jury :

| | |
|---------------|--|
| Rapporteurs : | Jean-Louis Barrat Stefano Zapperi |
| Examineurs | Leticia F. Cugliandolo Carmen Miguel Dominique Salin |

Introduction

Il y a dans la nature de nombreux exemples de systèmes qui répondent à un apport continu d'énergie par de brusques libérations de cette énergie accumulée, sous la forme d'événements singuliers, usuellement dénommés "avalanches". Les inversions de domaine magnétique, les libérations de contrainte lors des séismes, l'évolution des fronts de mouillage sur surface rugueuse sont autant d'exemples de tels systèmes. Une caractéristique intrigante de la plupart de ces systèmes est que la taille de leurs avalanches est distribuée en loi de puissance, ce qui est un symptôme de l'absence de longueur de corrélation intrinsèque au système (comme dans les *transitions de phases continues*, à l'équilibre, où la longueur de corrélation diverge au point critique). L'analyse théorique de tels systèmes est bâtie sur les points partagés par les différents processus et vise à identifier les quelques ingrédients fondamentaux, nécessaires pour expliquer les points communs de phénoménologie. De nombreux modèles microscopiques résultent en des comportements critiques et donc produisent des lois de puissance, cependant dans la plupart des cas les exposants ne peuvent prendre leur valeur que parmi un ensemble très limité de valeurs, qui correspondent à l'existence de quelques (rares) *classes d'universalité*.

Depuis bientôt vingt ans, un effort a été fourni pour comprendre les séismes dans le cadre de ces phénomènes collectifs critiques hors d'équilibre. Plusieurs modèles théoriques sont capables de reproduire une statistique libre d'échelle (loi de puissance) similaire à celle présente dans les événements sismiques, mais sont incapables de reproduire des observations élémentaires telles que l'existence de répliques après un tremblement de terre "principal" ou bien la valeur anormale pour l'exposant de la loi de Gutenberg-Richter. À une échelle plus modeste, au niveau de la friction des solides, on peut noter qu'il n'existe pas à ce jour de théorie générale prenant en compte les hétérogénéités de chaque surface et l'aspect collectif du déplacement, de la fracture et des contacts des aspérités. Les théories actuellement disponibles ne parviennent pas à reproduire certains *effets non stationnaires* tels que l'augmentation de la friction statique avec le temps ou bien la possibilité de la décroissance de la force de friction cinétique lorsque la vitesse de glissement augmente.

Une première classe de modèles (au sens de la classe d'universalité) qui présentent une transition de phase hors d'équilibre bien définie est celle du dépiégeage d'une interface (ou plus généralement une variété) élastique étendue sous forçage, conduite à travers un paysage (aléatoire) désordonné [Fis98, Kar98]. Pendant qu'elle est tirée à travers un environnement désordonné, l'interface est alternativement attrapée par les hétérogénéités (piégée) et libérée (dé-piégée) par

le forçage. Malgré son caractère localement intermittent, la dynamique d'ensemble de l'interface est stationnaire, ce qui permet d'utiliser différentes approches analytiques et numériques. Un aspect remarquable de ce système (partagé par les autres classes d'universalités) est que le comportement macroscopique (aux grandes échelles) n'est pas affecté par le choix précis des détails de la dynamique microscopique. Conséquemment, le modèle de la transition de dépiégeage décrit avec succès différents phénomènes, tels que le bruit de Barkhausen dans les ferromagnétiques [ABBM90, ZCDS98, DZ00, DZ06], la propagation des fractures dans les matériaux friables [ANZ06, BSP08, BB11] ou encore le déplacement des fronts de mouillage sur surfaces rugueuses [RK02, MRKR04, LWMR09]. Bien que ce cadre soit a priori bien adapté à décrire la friction solide et donc les séismes, le comportement stationnaire lui-même est un obstacle majeur à la comparaison entre résultats théoriques et données expérimentales : le phénomène des répliques, par exemple, est clairement non stationnaire.

Une seconde classe de tels modèles est celle de la Percolation Dirigée (DP en anglais) [HHL08, Hin06, Ó04, Hin00]. Elle modélise la croissance, l'étalement et la mort aléatoire d'une certaine densité "d'activité" au cours du temps, à la manière d'une avalanche. Sur un réseau, chaque site peut être actif ou bien inactif, et à chaque pas de temps chaque site actif tente d'activer chacun de ses voisins, avec une probabilité de succès p . Lorsque tous les sites sont devenus inactifs, l'avalanche est terminée et l'état du système n'évolue plus. Cet état inactif est un "état absorbant" de la dynamique : la transition de la DP est une *transition de phase à état absorbant*. À une certaine valeur de la probabilité p , le système est au point critique : la plupart des observables stochastiques sont alors distribuées en lois de puissance, caractérisées par des exposants critiques bien définis. De nombreux phénomènes de réaction-diffusion partagent les mêmes exposants et les mêmes fonctions d'échelle, c'est-à-dire que la classe d'universalité de la DP est étendue et robuste. Nous utilisons le processus de la DP comme modèle jouet d'avalanche qui se propage de façon Markovienne.

Dans cette thèse, partant de modèles de transitions de phase hors d'équilibre avec dynamique stationnaire, nous proposons et étudions des *variantes* pourvues d'effets non stationnaires, préservant cependant leur aspect critique.

Le processus physique qui motive la plupart de nos choix est celui de la friction solide sèche (i.e. absence de lubrifiant). En réalité, durant cette thèse notre principale préoccupation était à l'origine d'appliquer les méthodes de la physique statistique aux événements sismiques, cependant vers la fin de la thèse nous nous sommes recentrés sur la friction solide à l'échelle du laboratoire, un domaine bien mieux contrôlé. Comme ce contexte expérimental n'est pas spécialement étudié par la communauté des systèmes désordonnés, nous introduisons le problème de la friction dans le chapitre 1. Lors de notre revue de la phénoménologie élémentaire de la friction ainsi que des aspects bien établis de la théorie, nous parvenons à identifier les propriétés essentielles que tout modèle de friction devrait inclure. Deux points émergent clairement. Le premier est le besoin de tenir compte de l'aspect désordonné des surfaces en jeu : les aspérités forment un réseau aléatoire de contacts qui se brisent et se reforment en permanence, et les surfaces sont hétérogènes, de telle façon que la résistance des contacts est distribuée aléatoirement. Le deuxième est la pertinence de certains mécanismes lents (tels que le fluage) qui permettent d'accroître la résistance des contacts au cours du temps. Ce dernier point est particulièrement pertinent aux vitesses de glissement très faibles, ou bien lorsqu'il n'y a pas de déplacement. Nous

nous concentrons sur ces régimes lents, qui sont responsables du comportement non-trivial de la friction et qui deviennent primordiaux lorsque l'on considère les failles tectoniques.

La physique des séismes est un domaine vaste et assez complexe, mais qui présente certains avantages pour notre étude. Un premier point d'intérêt est que le glissement des plaques tectoniques peut être considéré comme une application de la friction solide sèche à large échelle, en première approximation. Cette "application" a été étudiée de façon assez extensive pour elle-même, et une grande quantité de données est disponible. Ceci permet d'utiliser les failles sismiques pour tester les prédictions de nos modèles de friction. Un deuxième point d'intérêt est le grand nombre de modèles de séismes générés par la communauté des géophysiciens : ces modèles peuvent servir comme point de départ pour comprendre la friction comme un phénomène collectif, plutôt que comme un simple problème de mécanique des milieux continus. Ceci justifie notre revue rapide des phénomènes sismiques et des modèles historiques afférents, présentés en chapitre 2.

La bijection entre un modèle sismique et le problème du dépiégeage d'une variété élastique est une transition naturelle vers notre revue de la transition de dépiégeage, au chapitre 3. Nous y introduisons tous les concepts nécessaires à la compréhension de notre modèle de dépiégeage modifié. Nous y expliquons les propriétés critiques de cette *transition de phase dynamique* qu'est la transition de dépiégeage, nous passons en revue les relations d'échelle ainsi qu'une approche plutôt originale pour traiter le champ moyen. Bien que la classe d'universalité du dépiégeage soit robuste, nous sommes forcés de reconnaître son incapacité à rendre compte des phénomènes de friction (et donc a fortiori des phénomènes sismiques).

Grâce aux notions présentées dans les chapitres précédents, notre choix de variante du dépiégeage apparaît comme un choix naturel. Le point de départ de notre analyse consiste à remarquer que le dépiégeage conventionnel ne laisse de place pour aucun effet dynamique durant les périodes séparant deux avalanches consécutives. Afin de parer à ce manquement, nous introduisons dans le chapitre 4 un modèle d'interface *viscoélastique* sous forçage en milieu aléatoire, qui autorise une relaxation lente entre deux avalanches. Les interactions viscoélastiques peuvent être vues comme une façon simple de prendre en considération le phénomène de fluage, qui est l'élément essentiellement responsable des particularités de la friction à faible vitesse. Après une discussion des nouveautés dans le comportement qualitatif de l'interface viscoélastique, nous présentons une dérivation de sa dynamique de champ moyen. En généralisant l'approche utilisée pour résoudre le champ moyen du dépiégeage élastique, nous sommes capable de calculer le comportement de l'ensemble du nouveau système, qui est d'ailleurs non stationnaire, et ponctué périodiquement par des événements touchant l'ensemble du système. Nous notons également que l'ajout d'une partie "visco-" dans l'interaction élastique est pertinente dans la limite macroscopique. En comparant la dynamique de champ moyen à diverses vitesses avec les résultats expérimentaux, nous trouvons un bon accord d'une part avec les expériences fondamentales de friction (chap. 1) et d'autre part avec les observations sur la statistique des séismes (chap. 2). En deux dimensions, nous n'avons accès qu'aux méthodes numériques, mais nous sommes capables de les utiliser sur des systèmes de tailles gigantesques (jusqu'à 15000×15000 sites sur un seul CPU), ce qui nous permet de dévoiler des propriétés qui rappellent le comportement de champ moyen. Les différents produits de nos simulations (exposants critiques, motifs spatio-temporels des répliques, etc.) sont en bon accord avec les résultats issus des observations du chap. 2 (voir la section 4 pour une description plus détaillée des résultats du modèle). Lors de la comparaison de notre modèle avec d'autres modèles pensés pour d'autres contextes expérimentaux (plasticité

des amorphes, matériaux granulaires, etc.) nous notons des similarités dans les briques élémentaires qui constituent ces modèles, ainsi qu’une tendance commune à produire des événements globaux (qui touchent l’ensemble du système).

Durant cette thèse, la majorité du travail a été concentré sur l’étude de différentes variantes non stationnaires du modèle de dépiégeage, avec une emphase sur les applications du modèle aux séismes. En chemin, nous avons croisé la percolation dirigée (DP) et avons construit et étudié une variation qui a à voir avec la non-stationnarité, bien que le modèle que nous proposons soit très différent de celui du chapitre 4. Le dernier chapitre (chap. 5) permet ainsi de considérer les modèles d’avalanche avec plus de recul. Nous fournissons un lien intuitif entre la DP et le problème du dépiégeage d’interface en montrant à quel point il est nécessaire de modifier la PD pour retrouver les avalanches du modèle d’interface élastique. Nous introduisons ensuite une variante non-markovienne du processus de DP, dans laquelle la probabilité d’activer un site au premier essai et au second diffère des probabilités d’activation des essais ultérieurs. Ceci fournit une mémoire implicite au système, rendant la dynamique microscopique non stationnaire. Cette DP modifiée présente un comportement critique particulier, avec certains exposants qui dépendent continûment des valeurs précises de la première et seconde probabilité d’activation, tandis que d’autres ne changent pas. Plus précisément, une seule relation d’échelle est brisée par la nouvelle dynamique, de sorte que la nouvelle classe d’universalité préserve la majeure partie de la structure de son parent (i.e. la DP “pure”). Un problème ouvert (de longue date) est de trouver un système expérimental qui appartiendrait à la classe d’universalité de la DP : jusqu’à présent, il n’en existe aucun [Ó04]. Notre nouveau modèle, qui inclut la classe de la DP comme un cas particulier, ouvre la voie à de telles réalisations expérimentales, à condition de considérer des classes d’universalité plus larges que la DP.

En conclusion, nous justifions le parcours qui structure cette thèse et jetons quelques idées de perspectives (chap. 6).

Dans chaque chapitre de la thèse, nous fournissons à chaque fois une introduction très rapide, qui donne simplement l’objectif du chapitre et sa structure. Dans les conclusions, nous résumons toujours les résultats principaux et donnons la motivation pour le chapitre suivant, ou bien quelques perspectives. Les appendices du manuscrit contiennent des détails techniques ou des résultats non cruciaux à la présentation. Bien que chaque chapitre soit une entité auto-suffisante, lire les précédents permet de comprendre pleinement les suivants, et d’apprécier pleinement leur portée. Les articles publiés durant cette thèse sont [JLR14] et [LRJ12], ils correspondent essentiellement aux chapitres 4 et 5 (respectivement). La synthèse ici présentée en français vise à donner une ouverture sur le manuscrit complet, et repose donc en grande partie sur les conclusions de chaque chapitre. Le lecteur intéressé par l’un des chapitres ici synthétisés est invité à se reporter au texte complet (en anglais) pour plus de substance. À la fin de ce document, nous reproduisons la table des matières du texte complet.

Chapitre 1

Introduction à la Friction

Ce chapitre vise à donner une brève revue de la friction sèche, c'est-à-dire en l'absence de lubrifiants. Nous présentons tout d'abord les lois phénoménologiques issues des observations expérimentales, puis les rudiments de la théorie de la friction (incomplète à ce jour). Les observations peuvent être résumées mathématiquement à l'aide des "Rate-dependent and State-dependent Friction laws", que nous nommons ici lois RSF. De très bonnes revues sur le sujet sont les références [Per00, PT96, Kri02]. Au passage, nous commentons la littérature existante et jetons quelques conclusions sur de possibles directions pour de futur travaux, en particulier pour les physiciens statisticiens.

Conclusion du chapitre : la friction implique de l'aléatoire et de la visco-élasticité.

Les modèles microscopique de friction doivent prendre en compte le caractère aléatoire présent dans la friction solide. Une première source de stochasticité vient des fluctuations thermiques, qui sont responsables du fluage [PDW11], qui joue un rôle clef dans le vieillissement des contacts. Une seconde source d'aléatoire est la présence de "désordre gelé", induit par les hétérogénéités et la rugosité des surfaces en présence. L'idée que le caractère auto-affine des surfaces est crucial dans la détermination des propriétés de friction est maintenant une chose bien établie [Per01, PAT⁺05], en particulier elle permet d'expliquer naturellement la deuxième loi d'Amontons (proportionnalité de la force de friction et du chargement appliqué normalement à la surface). Cependant, la plupart des modèles phénoménologiques (e.g. [RB91, PAT⁺05]) ne traitent que des propriétés moyennées induites par le désordre (moyen) et négligent les fluctuations de la dynamique. Comme nous le verrons dans le chapitre 3, la validité de cette hypothèse est une affaire d'échelle [PT96, CN98]. Aux échelles petites et modérées (telles que dans les expériences de laboratoire), le déplacement peut être décrit de façon déterministe par des équations telles que les équations de la loi RSF. Aux échelles nettement plus grandes, le déplacement est en réalité stochastique et présente une dynamique d'avalanche très complexe. Ceci est le cas en particulier dans la dynamique des failles tectoniques, qui est caractérisée par de brusques soubresauts d'activité (les séismes) qui sont aléatoires en magnitude, en temps et en position spatiale.

Les quelques tentatives pour inclure véritablement l'aléatoire dans des modèles de friction ont eu jusqu'à présent un écho plutôt limité. Ces autres tentatives font défaut, soit dans la façon de prendre en compte l'aléatoire, soit parce qu'elles négligent le rôle du vieillissement microscopique.

rique, qui est crucial pour produire les lois RSF. En fin de compte, il n’y a pas à ce jour de consensus sur les fondations microscopiques des lois RSF, même lorsque l’on utilise de tels modèles : la recherche d’un modèle microscopique simple et convaincant permettant de reproduire des lois RSF réalistes est toujours un problème ouvert.

Pour résumer, crûment, il y a deux problèmes principaux qui doivent être traités afin de décrire la friction de façon adéquate. Le premier est celui de la nature fluctuante et hétérogène des contacts impliqués : on doit utiliser une approche stochastique. Le deuxième est le vieillissement inhérent aux mécanismes microscopiques de contact. Pour traiter ces deux problèmes, considérer le champ ou degré de liberté naturel (d’ordinaire le champ de contrainte compressive ou l’emplacement courant des contacts) s’avère insuffisant. Au lieu de cela, on est contraint d’ajouter un degré de liberté supplémentaire (faire un “rajout”), c’est-à-dire de considérer la dynamique du champ de déplacement comme non Markovienne.

Chapitre 2

Application de la friction aux failles sismiques

Dans le chapitre 2, notre objectif n'est pas de donner une revue complète de la physique des séismes, qui a à voir avec de nombreuses branches des sciences naturelles, de la chimie à la planétologie. Plutôt, nous essayons de donner une idée générale des résultats bien acceptés en géophysique et sismologie, en gardant à l'esprit que nous sommes intéressés par le point de vue de la physique statistique. De bonnes revues sur ce sujet sont [Run03, BZ08]. La référence classique en géophysique est [Sch02].

Conclusion : les séismes utilisés comme un cas test.

La dynamique des failles sismique est bien plus complexe qu'une simple application à large échelle de la friction. Cependant, les forces de friction solide jouent un rôle primordial dans la dynamique des failles, et la géophysique peut être utilisée comme un cas test pour les modèles de friction, qui peuvent en retour nous aider à développer une intuition à propos des mécanismes microscopiques en jeu dans les failles. À cet égard, il faut reconnaître le rôle de la géophysique comme une force ayant stimulé la recherche de compréhension des mécanismes détaillés de la friction. En parallèle, il faut aussi noter que de nombreux modèles de failles se contentent d'inclure à la main les lois RSF (de façon ad-hoc).

Au contraire, dans cette thèse nous nous intéressons à des modèles aux fondations micro- ou pour le moins méso-scopiques, puisque notre préoccupation principale est de comprendre comment des lois de friction non triviales peut émerger d'interactions microscopiques simples et bien comprises.

Chapitre 3

Interfaces élastiques sous forçage en milieu aléatoire

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle de système étendu, désordonné et forcé hors d'équilibre par des forces externes, qui présente une transition de phase hors d'équilibre, ou *transition de phase dynamique*. Partant de quelques lois microscopiques très simples, on obtient un comportement critique non trivial avec des avalanches qui rappellent quelque peu les séismes.

Nous commençons par définir le modèle d'une interface élastique tirée uniformément à travers un milieu aléatoire. Nous introduisons ensuite une autre forme de forçage externe, plus approprié à l'étude des avalanches. Après avoir expliqué la transition, ses exposants et les relations d'échelle en dimension finie, nous présentons deux techniques pour résoudre le champ moyen, la seconde étant plus souple (et utile dans le chapitre suivant). Nous présentons finalement quelques généralisations bien connues du problème, montrant ainsi combien le cadre du modèle est étendu.

Malgré une grande robustesse du modèle vis à vis de différents changements microscopiques et une large gamme d'applications expérimentales, nous dévoilons certaines failles du modèle en ce qui concerne sa pertinence pour la friction ou les failles sismiques.

Conclusion : le dépiégeage élastique n'est pas la friction.

Nous avons défini le dépiégeage élastique et présenté ses propriétés les plus marquantes. Grâce à de simples arguments d'échelle, des calculs en champ moyen et des simulations numériques, nous avons clairement établi les propriétés caractéristiques de la transition de dépiégeage. Dans cette transition de phase dynamique entre une phase en mouvement et une phase statique, nous observons des avalanches distribuées en loi de puissance et une interface rugueuse (auto-affine). Ces propriétés rappellent quelque peu les processus de friction, où les interfaces en contact sont en général auto-affines, et les séismes, où les distributions d'événements sismiques sont en loi de puissance.

Cependant, malgré son large spectre d'application et sa robustesse à l'égard des petits changements, la transition de dépiégeage génère des avalanches qui ne reproduisent pas de façon satisfaisante les processus de friction ou les séismes. Quantitativement, les exposants des lois de puissance ne correspondent pas à ceux observés, et des propriétés qualitatives importantes n'apparaissent pas, telles que : l'existence du collé-glissé, des répliques ou du "velocity-weakening"

(affaiblissement de la friction lorsque la vitesse de glissement augmente).

En termes de construction microscopique, il y a de nombreuses correspondances avec les failles sismiques, mais aussi des différences importantes. Une première approximation dans le dépiégeage élastique est l'absence de mécanisme de vieillissement local, un manquement qui explique l'absence de "velocity-weakening", une propriété cruciale dans la génération des séismes. Nous verrons comment ce manquement est également responsable d'autres échecs du dépiégeage élastique à décrire les processus de friction. Un deuxième point est l'approximation de dynamique sur-amortie, qui peut ne pas être justifiée pour la friction. Comme nous le détaillons dans le chapitre 4, lorsque l'inertie est incluse, la transition de dépiégeage peut devenir du premier ordre [Pre01].

En conclusion, le cadre de la transition de dépiégeage offre une base prometteuse pour comprendre la friction et potentiellement les séismes, mais est loin de fournir une réponse concluante. Bien que représentant une classe d'universalité très large, le cadre du dépiégeage doit être généralisé afin de prendre en compte certains mécanismes fondamentaux pertinents pour la friction, tel que le vieillissement des contacts. C'est précisément ce que nous faisons dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Interfaces visco-élastiques sous forçage en milieu aléatoire

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que dans le cadre de la transition de dépiégeage, la dynamique suivie dans les périodes inter-avalanches est triviale, étant caractérisée simplement par un forçage monotone [Fis98, SDM01]. Cependant, l'ajout d'effets viscoélastiques avec leurs propres temps caractéristiques produit une dynamique dotée de propriétés nouvelles, que nous étudions dans ce chapitre. L'existence d'interactions viscoélastiques a des conséquences extrêmement importantes sur le comportement macroscopique du système, comme dans le contexte de la friction, où elle est liée à l'augmentation de la friction statique au cours du temps de contact stationnaire [Die72, Mar98]. Nous montrons ici comment ces processus de relaxation induisent génériquement une nouvelle dynamique d'avalanches, caractérisée par de nouveaux exposants critiques et des sursauts d'activité (les répliques) qui sont fortement corrélés dans l'espace et dans le temps. Grâce à sa simplicité, le modèle peut être traité analytiquement en champ moyen, et peut être simulé sur des tailles gigantesques en dimensions finies. Nous comparons notre modèle avec la littérature existante en deux temps : nous commençons par des modèles qui sont proches du nôtre, et concluons par une discussion sur des modèles issus d'autres contextes. Ceci nous permet de montrer qu'une tendance globale semble se dégager, qui tend à montrer que notre modèle pourrait jouer un certain rôle dans des domaines autres que la friction et ses applications.

Conclusions du chapitre : friction, tremblements de terre et perspectives.

Comme nous l'avons noté dans le chapitre précédent, malgré certaines similarités avec le contexte de la friction, le modèle d'une interface purement élastique est incapable de donner des prédictions correctes sur des expériences de friction.

Nous avons répondu à ce problème en incluant des interactions viscoélastiques, qui sont une façon naturelle de transcrire le fluage qui se produit au niveau des contacts. Cet ajout de viscoélasticité est une modification pertinente, au sens où l'addition d'une très petite quantité de "visco" aux interactions élastiques est suffisante pour affecter le comportement macroscopique.

En champ moyen, la relaxation d'éléments viscoélastiques génère une instabilité dynamique, dont nous démontrons qu'elle est responsable de l'occurrence d'événements périodiques, affectant l'ensemble du système, et d'oscillations macroscopiques de la contrainte (ou tension). La période typique de ces oscillations est distincte du temps microscopique associé à la partie "visco-" des

interactions viscoélastiques (qui est elle introduite directement dans les équations). Au lieu de cela, les oscillations sont caractérisées par une nouvelle échelle de temps, émergente. L'émergence de ce cycle découle de la compétition entre la relaxation viscoélastique lente et la dynamique d'avalanche, rapide : la dynamique lente conduit le système vers un point critique, que nous démontrons être instable pour la dynamique rapide. L'état résultant de cette compétition peut être défini comme un état hors d'équilibre *non* stationnaire – par opposition aux états hors d'équilibre stationnaires (NESS en anglais).

En deux dimensions, nous avons réalisé des simulations sur des systèmes gigantesques (jusqu'à 15000×15000 sites sur un unique processeur), ce qui nous a permis d'étudier des régimes autrement difficiles d'accès. Les oscillations globales trouvées en champ moyen disparaissent, bien qu'une trace de leur existence demeure, à travers l'existence de larges oscillations de la tension locale, sur des régions importantes. Dans chaque région, les oscillations du stress sont approximativement de la même amplitude mais ont une phase différente, de sorte qu'à chaque instant la distribution de la tension a une structure en forme de terrasses, avec de larges plateaux de tension pratiquement constante et des différences de tension macroscopiques entre deux plateaux. En ce sens, le modèle présente un comportement non-stationnaire dans ses deux versions : en champ moyen il a un comportement exactement périodique et en deux dimensions il oscille sur une échelle locale.

Comparaison de nos résultats avec des expériences de friction. Nos résultats sont en bonne correspondance avec les trois blocs élémentaires à la base des lois RSF, en particulier dans les cas champ moyen, que nous avons exploré plus à fond que le cas 2D. En premier lieu, notre modèle reproduit l'existence du stick-slip, avec une amplitude des oscillations du stress qui est cohérente avec les observations expérimentales : elle décroît lorsque la vitesse s'accroît, et lorsque la rigidité du forçage augmente. Deuxièmement, en étudiant la façon dont la force de friction cinétique (dans le régime stationnaire) dépend de la vitesse, nous sommes capables d'observer et d'expliquer l'effet dit de *velocity-weakening* (décroissance logarithmique de la friction avec l'augmentation de la vitesse). Troisièmement, la réponse de notre modèle à un forçage intermittent nous permet de reproduire qualitativement et de comprendre l'importance du vieillissement des contacts : nous observons une augmentation de la friction statique avec le temps de contact au repos.

L'ensemble des résultats de ce chapitre indique que les petits événements plastiques se produisant au niveau des contacts entre aspérités (responsable des lois RSF) sont bien capturés par un simple modèle doté d'interactions viscoélastiques. Notre travail permet de voir les différents effets macroscopiques observés non pas comme issus de l'application d'une certaine loi phénoménologique, mais comme des phénomènes collectifs, émergeant de considérations micro- et méso-scopiques. Un résultat secondaire de notre travail est d'étendre l'applicabilité du cadre du dépiégeage et des outils afférents au problème de la friction solide.

Comparaison de nos résultats avec la statistique des tremblements de terre. Les avalanches produites par notre modèle reproduisent de nombreuses propriétés importantes de la statistique des tremblements de terre. Les interactions viscoélastiques induisent une augmentation de la valeur de l'exposant de la distribution des avalanches (τ) qui correspond à la valeur donnée par la loi de *Gutenberg-Richter* (la moyenne mondiale). Cette propriété est d'ordinaire obtenue en ajustant des paramètres (*fine-tuning*), ce qui n'est pas le cas ici. Les répliques générées

sont naturellement définies comme des produits secondaires de leur séisme principal correspondant, comme c’est le cas en géophysique : dans ce domaine, les répliques sont en effet définies comme des tremblements de terre secondaires déclenchés par un événement principal, avec un délai qui peut aller des secondes aux années. Dans un modèle légèrement différent de celui présenté ici, la diminution du taux de production de répliques est qualitativement compatible avec la *loi d’Omori* connue des géophysiciens (décroissance en loi de puissance). Dans le modèle au coeur de notre présentation, le taux de production des répliques suit une loi de décroissance exponentielle, non réaliste. Les corrélations spatiales des répliques sont cohérentes avec *l’effet de migration* qui caractérise les séismes réels : les épices des répliques importantes sont situées à la frontière de la zone de glissement des événements parents. La relation linéaire entre aire et moment sismique que nous observons correspond à l’observation de *chute de stress constante* qui est souvent rapportée par les géophysiciens. De plus, les oscillations du champ de contrainte sont la manifestation du *cycle sismique*, c’est-à-dire de l’occurrence quasi-périodique de séismes importants dans certaines zones géographiques (ces événements répétés sont également appelés *séismes caractéristiques*).

Le fait que notre modèle reproduise les propriétés de base de la dynamique des failles sismiques indique une certaine robustesse de notre description des phénomènes de friction, puisque l’on sait que la dynamique des failles implique beaucoup plus de choses que la simple friction solide sèche. Nous pouvons également en conclure que les interactions viscoélastiques du genre de celles introduites dans notre modèle sont nécessaires pour saisir les propriétés de base de la dynamique sismique.

Perspectives Dans les sections du début et de la fin du chapitre, nous avons vu que des effets de relaxation similaires à la relaxation viscoélastique de notre modèle sont des effets pertinents dans toute une série de contextes autres que la friction ou les failles sismiques (les superconducteurs, les matériaux granulaires, la plasticité des milieux amorphes et cristallins etc.). Nous proposons une mise en équation de ce type de système sous la forme d’un problème “bien posé” portant sur deux champs suivant deux équations. Cette formulation pourrait s’avérer utile en vue de l’étude plus approfondie des mécanismes de relaxation affectant les systèmes conduits hors d’équilibre. Un avantage singulier de notre formulation est son lien étroit avec le problème du dépiégeage purement élastique : les configurations visitées par l’interface viscoélastique sont aussi des états métastables de certaines interfaces élastiques particulières.

Il y a plusieurs pistes pour poursuivre ce travail dans le futur. Une première chose à faire est de mieux caractériser la classe d’universalité du “dépiégeage viscoélastique”, en extrayant tous les exposants des différentes distributions (distributions de la taille, de l’aire, de la durée des avalanches, etc.) et d’extraire les relations d’échelle liant ces exposants entre eux. Dans le chapitre suivant, nous verrons pourquoi nous pouvons nous attendre à ce que certaines relations d’échelle soient maintenues, bien que nous soyons dans une classe d’universalité nouvelle, plus étendue que celle du dépiégeage élastique. En particulier, en champ moyen nous nous attendons à voir un nouvel exposant critique non trivial, qui pourrait être prédit par nos calculs analytiques.

Une deuxième chose à faire est d’étudier certaines extensions de notre modèle, qui devraient s’avérer intéressantes. Pour la friction de solides cristallins, on pourrait s’intéresser aux interactions (visco-)élastiques de longue portée transmises par le solide dans son volume, de façon similaire à ce qui a été fait dans [PDC⁺12]. Pour le cas des failles sismiques, on pourrait tenir

compte de la nature amorphe de la “fault gouge” en utilisant des interactions anisotropiques et de longue portée du type Kernel Eshelby ([MBB12] serait alors une source d’inspiration). Il y a aujourd’hui un problème ouvert qui demeure : celui de concevoir un modèle de friction qui tiendrait compte à la fois de la nature hétérogène des aspérités via un désordre gelé *et* de leurs déplacements via un désordre structurel, à la façon de ce qui a été initié dans [DBZU11]. Une autre modification du modèle serait de tenir compte du fait que dans le cas de la friction, la surface glisse de façon parallèle à elle même. Ceci pourrait être pris en compte en utilisant un corrélateur du désordre anisotropique.

Chapitre 5

Percolation Dirigée (DP) : une variante non-Markovienne

Un des exemples phares de modèle d’avalanches étudié pour ses propriétés critiques est la Percolation Dirigée (DP en anglais). La DP est un exemple paradigmatique de transition de phase dynamique vers un état absorbant (voir [HHL08, Hin06, Ó04, Hin00] pour des revues sur le sujet). Elle fournit un exemple de classe d’universalité robuste, au comportement critique bien étudié, qui génère des avalanches distribuées en loi de puissance. Une de ses caractéristiques remarquables est sa robustesse : de nombreux modèles microscopiques peuvent en effet être décrits efficacement par le scénario de la DP. Certains automates cellulaires sont des exemples simples de processus appartenant à la classe de la DP : dans ces modèles, des sites actifs ont une certaine probabilité d’activer leurs voisins, ce qui permet de propager l’activité sur de longues distances, au cours de grandes périodes de temps. Lorsque la probabilité d’activer un site pour la première fois est modifiée par rapport aux probabilités ultérieures, les propriétés critiques de la DP sont cependant perdues [GCR97, JDH03]. Nous avons montré qu’une compensation de cette modification peut être effectuée via un changement de la probabilité de seconde activation, auquel cas la criticalité est restaurée, dans un processus que nous avons nommé “compensation” [LRJ12]. Ce chapitre passe en revue ces résultats et les lie aux problèmes des interfaces élastiques et viscoélastiques.

Conclusion : une classe d’universalité étendue.

Nous montrons que la classe de la DP est fortement affectée par des modifications de la probabilité de première et seconde activation. Cette modification correspond à un cas particulier de mémoire de long terme dans laquelle chaque site se souvient exactement de combien de fois il a été activé (ou qu’on a essayé de l’activer). Notre résultat principal est que bien que le changement de la seule première tentative d’activation rende le problème non critique, un changement de la seconde probabilité de tentative d’activation permet de restaurer le caractère critique du modèle, dans un processus appelé compensation. Plusieurs exposants critiques trouvés au point de compensation ne coïncident pas avec ceux de la DP pure : en particulier, une symétrie de retournement temporel est violée à la compensation, ce qui change la valeur de l’un des exposants fondamentaux de la DP, tandis que les trois autres conservent leurs valeurs. Une propriété remarquable de la criticalité obtenue à la compensation est que les exposants dépendent

continûment de la valeur des probabilités d'activation, bien que presque toutes les relations d'échelle de la DP soient préservées.

Un problème bien connu de la communauté travaillant sur la DP est l'absence de réalisations expérimentales de la classe d'universalité de la DP [HJDRD99]. Ici, en incluant un simple effet de mémoire (qui peut également être reformulé en termes de champ auxiliaire) dans la dynamique DP, nous avons obtenu une version étendue de la classe DP. La DP pure est incluse dans ce modèle plus étendu : à cet égard, notre modèle offre l'espoir de trouver des classes d'universalité plus larges que la DP, mais qui partageraient encore certaines propriétés cruciales de la DP, comme la non-linéarité du coeur de la DP. Trouver une réalisation de cette classe de DP étendue devrait être plus aisé que pour le cas plus restrictif de la DP pure.

Mis à part les applications à des situations concrètes, nous voulons souligner le fait que le modèle présenté ici fournit un lien entre deux classes de modèles avec des comportements très différents : les modèles avec champ auxiliaire et le modèle d'infection (IM, Infection Model). Bien que nous obtenions les mêmes types de résultats que dans les modèles avec champ auxiliaire (criticalité avec certaines relations d'échelle préservées, symétrie de renversement temporel violée), notre description microscopique s'insère très bien dans le cadre des modèles de première infection (IM) modifiés, pour lesquels des calculs analytiques se sont montrés concluants [JDH03]. Ceci pourrait être une approche intéressante au problème ouvert des exposants dépendants des conditions initiales dans les transitions de phases à états absorbants.

Chapitre 6

Perspectives Générales

Ici, nous expliquons le chemin suivi durant cette thèse, et essayons de mettre nos résultats en perspective.

Les phénomènes sismiques représentent une réalisation frappante du type de statistique libre d'échelle attendue dans les transitions de phase hors d'équilibre. Cependant, ils représentent également une situation dans laquelle différents domaines des sciences naturelles jouent un rôle (de la chimie à la planétologie, en passant par la géologie). L'approche de la physique statistique est de tailler à la hache dans cette grande diversité de mécanismes, en essayant de trouver ceux qui sont pertinents. Cet angle d'attaque a déjà prouvé son efficacité : par exemple, au cours des 30 dernières années, l'universalité derrière la notion de désordre a été clarifiée, de sorte que l'on sait que de nombreuses variations dans le choix de la distribution du désordre sont non pertinentes à l'échelle macroscopique. Ceci permet de considérer la nature précise de la distribution des roches comme un paramètre sans importance. Des arguments similaires s'appliquent à d'autres paramètres variables, qui se trouvent être non pertinents à l'échelle macroscopique (par exemple la valeur précise de la force des interactions).

En se basant sur ces simplifications puissantes, des modèles de physique statistique simples permettent de prouver que la compétition entre l'élasticité, le désordre et le forçage externe est déjà suffisante pour reproduire certaines des principales caractéristiques de la dynamique des failles sismiques. Cependant, une inspection plus minutieuse des résultats expérimentaux révèle des différences importantes entre ces modèles et les véritables failles sismiques. Ces échecs démontrent la nécessité d'inclure au moins un nouvel élément dans la dynamique de ces modèles simplifiés.

Pour choisir de façon adéquate ce nouvel "ingrédient", nous considérons le cas plus simple du comportement frictionnel de matériaux secs, dans l'environnement bien contrôlé du laboratoire. Il est alors clair que certains mécanismes au niveau des contacts sont responsables des différents effets observés dans la friction à faible vitesse ("velocity-weakening", vieillissement des contacts au repos). Afin de conserver la simplicité des modèles, nous avons décidé de tenir compte de ces mécanismes en considérant les interactions à l'intérieur de chaque surface comme étant viscoélastiques plutôt que purement élastiques.

Ce choix simple se révèle être très judicieux, puisque nos résultats analytiques et numériques sont semblables aux observations sismologiques et aux expériences de friction. C'est une preuve

que pour comprendre la friction aux faibles vitesses, on doit tenir compte à la fois du désordre et de la viscoélasticité. Un effet secondaire de notre étude est de clairement poser le problème de la friction sèche dans le champ des systèmes désordonnés. Un compte rendu plus détaillé de la capacité de notre modèle à reproduire le comportement frictionnel serait intéressant, et constitue une piste intéressante pour des travaux futurs.

Indépendamment de la capacité précise du modèle à correspondre plus ou moins bien aux expériences, il est intéressant de s'interroger sur la généralité de notre approche. À cet égard, il est intéressant de noter que des propriétés communes semblent émerger des différents modèles microscopiques incluant à la fois du désordre et de la relaxation. En particulier, pour notre modèle nous avons prouvé que l'ajout de viscoélasticité est un changement pertinent, au sens où l'ajout d'une petite fraction "visco-" aux interactions élastiques affecte le comportement macroscopique du système. Séparément, l'observation de l'universalité dans les systèmes désordonnés ou dans les systèmes viscoélastiques date d'il y a longtemps, mais l'universalité émergeant de la combinaison des deux constitue un consensus qui est tout juste en train d'émerger.

Notre modèle est un bon candidat pour l'étude de la classe d'universalité étendue du "dépiégeage viscoélastique", car sa formulation simple permet à la fois un traitement analytique en champ moyen et des études numériques extensives en dimensions finies. Une suite naturelle de notre travail serait de réaliser l'analyse complète du modèle en dimension finie, en extrayant tous les exposants et en discutant toutes les relations d'échelles. Pour poursuivre dans cette direction, nous bénéficions d'un guide : nos résultats pour le modèle de DP modifiée. Dans ce cas, la nouvelle classe d'universalité présente de nombreuses propriétés communes avec le cas particulier de la DP pure, indiquant une certaine robustesse des "propriétés stationnaires". Les extensions naturelles de notre modèle qui devraient être considérées en priorité sont l'étude du cas en dimension finie avec interactions à longue portée (escompté être similaire à [PDC⁺12]) et le cas avec redistribution de contrainte quadripolaire et à longue portée (problème Eshelby).

Références

- [ABBM90] Bruno Alessandro, Cinzia Beatrice, Giorgio Bertotti, and Arianna Montorsi. Domain-wall dynamics and Barkhausen effect in metallic ferromagnetic materials. I. Theory. *Journal of Applied Physics*, 68(6) :2901–2907, 1990.
- [ANZ06] Mikko J Alava, Phani K V V Nukala, and Stefano Zapperi. Statistical models of fracture. *Advances in Physics*, 55(3-4) :349–476, 2006.
- [BB11] Daniel Bonamy and Elisabeth Bouchaud. Failure of heterogeneous materials : A dynamic phase transition ? *Physics Reports*, 498(1) :1–44, January 2011.
- [BSP08] D. Bonamy, S. Santucci, and L. Ponsón. Crackling Dynamics in Material Failure as the Signature of a Self-Organized Dynamic Phase Transition. *Physical Review Letters*, 101(4) :045501, July 2008.
- [BZ08] Yehuda Ben-Zion. Collective behavior of earthquakes and faults : Continuum-discrete transitions, progressive evolutionary changes, and different dynamic regimes. *Reviews of Geophysics*, 46(4) :RG4006, December 2008.
- [CN98] C. Caroli and P. Nozières. Hysteresis and elastic interactions of microasperities in dry friction. *The European Physical Journal B*, 4(2) :233–246, August 1998.
- [DBZU11] Karin a. Dahmen, Yehuda Ben-Zion, and Jonathan T Uhl. A simple analytic theory for the statistics of avalanches in sheared granular materials. *Nature Physics*, 7(7) :554–557, 2011.
- [Die72] James H. Dieterich. Time-dependent friction in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 77(20) :3690–3697, July 1972.
- [DZ00] Gianfranco Durin and Stefano Zapperi. Scaling Exponents for Barkhausen Avalanches in Polycrystalline and Amorphous Ferromagnets. *Physical Review Letters*, 84(20) :4705–4708, 2000.
- [DZ06] Gianfranco Durin and Stefano Zapperi. The role of stationarity in magnetic crackling noise. *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment*, 2006(01) :P01002–P01002, January 2006.
- [Fis98] Daniel S Fisher. Collective transport in random media : from superconductors to earthquakes. *Physics Reports*, 301(1-3) :113–150, 1998.
- [GCR97] P Grassberger, H Chaté, and G Rousseau. Spreading in media with long-time memory. *Physical Review E*, 55(3) :2488–2495, 1997.
- [HHL08] M Henkel, H Hinrichsen, and S Lübeck. *Non Equilibrium Phase Transitions - Volume 1 - Absorbing Phase Transitions*. Springer, 2008.

-
- [Hin00] Haye Hinrichsen. Nonequilibrium Critical Phenomena and Phase Transitions into Absorbing States. *Advances in Physics*, page 153, January 2000.
- [Hin06] Haye Hinrichsen. Non-equilibrium phase transitions. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 369(1) :1–28, September 2006.
- [HJDRD99] Haye Hinrichsen, Andrea Jiménez-Dalmaroni, Yadin Rozov, and Eytan Domany. Flowing Sand : A Physical Realization of Directed Percolation. *Physical Review Letters*, 83(24) :4999–5002, December 1999.
- [JDH03] Andrea Jiménez-Dalmaroni and Haye Hinrichsen. Epidemic processes with immunization. *Physical Review E*, 68(3) :36103, 2003.
- [JLR14] E. A. Jagla, François P. Landes, and Alberto Rosso. Viscoelastic Effects in Avalanche Dynamics : A Key to Earthquake Statistics. *Physical Review Letters*, 112(17) :174301, April 2014.
- [Kar98] Mehran Kardar. Nonequilibrium dynamics of interfaces and lines. *Physics Reports*, 301(1-3) :85–112, July 1998.
- [Kri02] J Krim. Resource Letter : FMMLS-1 : Friction at macroscopic and microscopic length scales. *American Journal of Physics*, 70(9) :890, 2002.
- [LRJ12] François Landes, Alberto Rosso, and E Jagla. Tuning spreading and avalanche-size exponents in directed percolation with modified activation probabilities. *Physical Review E*, 86(4) :1–8, 2012.
- [LWMR09] P. Le Doussal, K. J. Wiese, S. Moulinet, and E. Rolley. Height fluctuations of a contact line : A direct measurement of the renormalized disorder correlator. *EPL (Europhysics Letters)*, 87(5) :56001, September 2009.
- [Mar98] Chris Marone. Laboratory-Derived Friction Laws And Their Application to Seismic Faulting. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1) :643–696, 1998.
- [MBB12] Kirsten Martens, Lydéric Bocquet, and Jean-louis Barrat. Spontaneous formation of permanent shear bands in a mesoscopic model of flowing disordered matter. *Soft Matter*, 8(15) :4197, 2012.
- [MRKR04] Sébastien Moulinet, Alberto Rosso, Werner Krauth, and Etienne Rolley. Width distribution of contact lines on a disordered substrate. *Physical Review E*, 69(3) :035103, March 2004.
- [Ó04] Géza Ódor. Universality classes in nonequilibrium lattice systems. *Reviews of Modern Physics*, 76(3) :663–724, August 2004.
- [PAT⁺05] B N J Persson, O Albohr, U Tartaglino, a I Volokitin, and E Tosatti. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion. *Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal*, 17(1) :R1—R62, 2005.
- [PDC⁺12] Stefanos Papanikolaou, Dennis M Dimiduk, Woosong Choi, James P Sethna, Michael D Uchic, Christopher F Woodward, and Stefano Zapperi. Quasi-periodic events in crystal plasticity and the self-organized avalanche oscillator. *Nature*, 490(7421) :517–521, 2012.
- [PDW11] Thibaut Putelat, Jonathan H P Dawes, and John R Willis. On the microphysical foundations of rate-and-state friction. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(5) :1062–1075, 2011.

- [Per00] Bo N J Persson. *Sliding Friction : Physical Principles and Applications*. NanoScience and Technology. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, second edition, 2000.
- [Per01] B. N. J. Persson. Theory of rubber friction and contact mechanics. *The Journal of Chemical Physics*, 115(8) :3840, 2001.
- [Pre01] Thomas Prellberg. Depinning in Driven Viscoelastic Media with Disorder : a Dynamical Phase Transition, 2001.
- [PT96] B. N. J. Persson and E. Tosatti, editors. *Physics of Sliding Friction*. Springer Netherlands, Dordrecht, 1996.
- [RB91] John B. Rundle and Stephen R. Brown. Origin of rate dependence in frictional sliding. *Journal of Statistical Physics*, 65(1-2) :403–412, October 1991.
- [RK02] Alberto Rosso and Werner Krauth. Roughness at the depinning threshold for a long-range elastic string. *Physical Review E*, 65(2) :025101, January 2002.
- [Run03] John B. Rundle. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems. *Reviews of Geophysics*, 41(4) :1019, 2003.
- [Sch02] C H Scholz. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2 edition, 2002.
- [SDM01] J P Sethna, K A Dahmen, and C R Myers. Crackling noise. *Nature*, 410(6825) :242–50, March 2001.
- [ZCDS98] Stefano Zapperi, Pierre Cizeau, Gianfranco Durin, and H Stanley. Dynamics of a ferromagnetic domain wall : Avalanches, depinning transition, and the Barkhausen effect. *Physical Review B*, 58(10) :6353–6366, 1998.